



**UNIVERSITY OF BAYREUTH**  
**Department of Micrometeorology**

---

**Klimatologische und mikrometeorologische  
Forschungen  
im Rahmen des  
Bayreuther Institutes für Terrestrische  
Ökosystemforschung (BITÖK)  
1989 – 2004**

**Thomas Foken (Hrsg.)**

---

**Arbeitsergebnisse  
Nr. 29  
Bayreuth, Juni 2005**

---

Arbeitsergebnisse, Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie, Print, ISSN 1614-8916  
Arbeitsergebnisse, Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie, Internet, ISSN 1614-8924  
<http://www.bayceer.uni-bayreuth.de/mm/>

Eigenverlag: Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie  
Vervielfältigung: Druckerei der Universität Bayreuth  
Herausgeber: Prof. Dr. Thomas Foken

Universität Bayreuth, Abteilung Mikrometeorologie  
D-95440 Bayreuth

Die Verantwortung über den Inhalt liegt beim Autor.

# Einleitung

Das Bayreuther Institut für Terrestrische Ökosystemforschung (BITÖK) war von 1989 bis 2004 eine zentrale Einrichtung der Universität Bayreuth. Während der Projektförderung des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (BMBF) wurden in dieser Zeit vier neue Lehrstühle an der Universität Bayreuth eingerichtet. Diese Lehrstühle sind seit 2005 Mitglieder der Fakultät für Biologie, Chemie und Geowissenschaften der Universität Bayreuth. Des Weiteren wurden mehrere Abteilungen, u.a. die Abteilung Klimatologie (war im Einrichtungsantrag nicht vorgesehen und ging teilweise aus dem nicht besetzten Lehrstuhl für Toxikologie hervor), eingerichtet, deren Leitung im Falle der Abteilung Klimatologie der Professur für Meteorologie (ab 1997 Mikrometeorologie) oblag. Ab 2005 ist diese Abteilung in die Abteilung Mikrometeorologie eingegliedert.

Die Ökosystemforschung am BITÖK verfolgte im Allgemeinen die Zielsetzungen:

- Verständnis der Dynamik von Stoffumsätzen in Ökosystemen
- Vorhersage und Erklärung des Verhaltens bei Umweltänderungen
- Erarbeitung von Konzepten zur nachhaltigen Ökosystemnutzung
- Abschätzung der Auswirkung technischer und umweltpolitischer Maßnahmen auf Ökosysteme

Die Abteilung Klimatologie war schwerpunktmäßig in den ersten beiden Schwerpunkten vertreten und hat dabei sowohl Trends von Umweltveränderungen als auch Prozessuntersuchungen zu Energie- und Stofftransporten (experimentell und Modellentwicklungen) untersucht. Mit den Forschungen zu Klimaveränderungen wurde zumindest im lokalen Bereich ein deutlicher Einfluss auf umweltpolitische Maßnahmen genommen.

BITÖK leistete dabei schwerpunktmäßig Beiträge

- zur Analyse und Quantifizierung des Stickstoff-, Schwefel- und Wasserhaushalts von bewaldeten Wasser-Einzugsgebieten und
- zur Modellierung dieser Stoffumsätze auf der Ökosystemebene.

Zu beiden Komplexen wurden entsprechende Beiträge geliefert, wobei insbesondere in der zweiten Hälfte der BITÖK-Forschungen der Kohlenstoffhaushalt stärker berücksichtigt wurde. Grundlage dafür war die Einrichtung der FLUXNET-Station (anfangs EUROFLUX) Waldstein-Weidenbrunnen. Die Arbeiten der Abteilung waren nahezu ausschließlich auf diesen Standort orientiert. Ab 1999 wurden zusätzliche Messungen am Wiesenstandort im oberen Egertal ‚Voitsumra‘ durchgeführt.

Das BMBF-Vorhaben BEO 51 0339476 unterteilte sich in die Phasen A–D, wobei die klimatischen und lufthygienischen Fragestellungen in allen Antragsperioden ein Schwerpunkt der Forschungen waren. Eine Übersicht zu den einzelnen Themen und den internen Zwischen- und Endberichten ist in Tab. 1 gegeben. Daneben bestanden eine Vielzahl weiterer Forschungsprojekte im Rahmen anderer Förderprogramme, die sehr eng mit den BITÖK-Projekten verknüpft waren.

Wesentliche Ergebnisse sind auch in den Ecological Studies (Matzner, E (Editor), (2004) Biogeochemistry of forested catchments in a changing environment: a German case study. Ecological Studies, 172. Springer, Berlin, Heidelberg) erschienen. Dabei waren alleine neun Beiträge aus den Abteilungen Klimatologie und Mikrometeorologie.

**Tab. 1:** Projekte der Abteilung Klimatologie des BITÖK in den Jahren 1989-2004 einschließlich Angaben zur Publikation der Projektberichte im ‚Bayreuther Forum Ökologie‘ (BFÖ) bzw. in internen Zwischenberichten

<b>Zeit</b>	<b>V: Verantwortlicher B: Bearbeiter</b>	<b>Thema</b>	<b>Z: Zwischenbericht B. Bericht</b>
1990	<b>V:</b> R. Eiden <b>B:</b> K. Peters J. Burkhardt	Die Bestimmung des Stoffeintrages in Nadelwälder durch trockene Deposition von Aerosolpartikeln und durch Taubildung	Z: 1990; S. 20-22
1991	<b>V:</b> R. Eiden <b>B:</b> K. Peters	Die mathematische Modellierung der trockenen Deposition von Aerosolpartikeln auf Fichtenbestände	Z: 1991; S. 69-76
1991	<b>V:</b> R. Eiden <b>B:</b> J. Burkhardt	Untersuchungen zum Depositionsprozess atmosphärischer Partikel und Gase auf Pflanzenoberflächen	<b>Z:</b> 1991; S. 77-84 <b>B:</b> BFÖ 9 (1994), 143 S.
1989-1992	<b>V:</b> R. Eiden <b>B:</b> K. Peters J. Burkhardt J. Gerchau	Die Bestimmung des Stoffeintrages in Nadelwälder durch trockene Deposition von Aerosolpartikeln und durch Taubildung (1,1 Mio DM)	B: 1989-1992; S. 8-17
1993	<b>V:</b> K. Peters <b>B:</b> G. Bruckner-Schatt	The atmospheric input of inorganic nitrogen and sulphur by dry deposition of aerosol particles to a spruce stand	Z: 1993, 51 – 53 <b>B:</b> BFÖ 29 (1996), 232 S.
1993	<b>V:</b> K. Peters <b>B:</b> J. Burkhardt	The filtering of aerosol particles by a spruce canopy – Measurements versus model calculations	Z: 1993, 97-99
1994	<b>V:</b> K. Peters	Dry deposition of sulfur compounds to spruce forests in the Fichtelgebirge	<b>Z:</b> 1994, S. 149-153
1994	<b>V:</b> K. Peters <b>B:</b> N. Kanchanakanti	The formation of thin water films on plant surfaces and their influence on the deposition of atmospheric trace gases	<b>Z:</b> 1994, S. 154-158
1995-97	<b>V:</b> R. Eiden/Th. Foken <b>B:</b> K. Peters/ O. Klemm	Bestimmung der Deposition gasförmiger und partikelgebundener S- und N-Verbindungen im Einzugsgebiet des Lehstenbaches	<b>Z:</b> BFÖ 41 (1997), 153-157 <b>B:</b> BFÖ 56 (1998), 19-40, 200-201
1998-2000	<b>V:</b> O. Klemm, Th. Foken <b>B:</b> O. Klemm, J. Gerchau	Einfluss der Blattfeuchte auf die Depositionsgeschwindigkeit wasserlöslicher Gase	<b>Z:</b> BFÖ 78 (2000), 67-78 <b>B:</b> BFÖ 84 (2001), 77-91
1998-2000	<b>V:</b> O. Klemm <b>B:</b> T. Wrzesinsky/ A. Mangold	Phasenverteilung von Stickstoffverbindungen in der bodennahen Atmosphäre	<b>Z:</b> BFÖ 78 (2000), 79-92 <b>B:</b> BFÖ 84 (2001), 93-102

**Tab. 1:** Fortsetzung

<b>Zeit</b>	<b>V: Verantwortlicher B: Bearbeiter</b>	<b>Thema</b>	<b>Z: Zwischenbe- richt B: Bericht</b>
1998-2000	<b>V:</b> O. Klemm <b>B:</b> O. Klemm, Th. Foken, J. Gerchau	Klimatologie und Luftverschmutzung im Fichtelgebirge	<b>Z:</b> BFÖ <b>78</b> (2000), 93-108 <b>B:</b> BFÖ <b>84</b> (2001), 103-121
1998-2000	<b>V:</b> Th. Foken, N. Buchmann <b>B:</b> B. Wichura	Pools und Flüsse des stabilen Kohlenstoffisotops <sup>13</sup> C zwischen Boden, Vegetation und Atmosphäre in verschiedenen Pflanzengemeinschaften des Fichtelgebirges	<b>Z:</b> BFÖ <b>78</b> (2000), 109-130 <b>B:</b> BFÖ <b>84</b> (2001), 123-153
2001-04	<b>V:</b> O. Klemm/J. Lüers, Th. Foken <b>B:</b> O. Klemm/J. Lüers, J. Gerchau/J. Olesch	Klimatologie und Deposition von Luftschadstoffen	<b>Z:</b> BFÖ <b>99</b> (2002), 16-25 <b>Z:</b> BFÖ <b>101</b> (2003), 17-26 <b>B:</b> vorliegendes Heft
2001-04	<b>V:</b> Th. Foken <b>B:</b> C. Thomas	Einflüsse kohärenter Strukturen auf den Energie- und Stoffaustausch in hohen Beständen	<b>Z:</b> BFÖ <b>101</b> (2003), 27-33 <b>B:</b> vorliegendes Heft
2001-04	<b>V:</b> Th. Foken <b>B:</b> J. Ruppert	Messung turbulenter Flüsse von Kohlendioxid und dem stabilen Kohlenstoffisotops <sup>13</sup> C über Pflanzenbeständen mit Hilfe der Relaxed Eddy Accumulation Methode	<b>Z:</b> BFÖ <b>101</b> (2003), 35-40 <b>B:</b> vorliegendes Heft

Der vorliegende Band enthält die Abschlussberichte der vierten Antragsperiode aus der Abteilung Klimatologie, da eine zentrale Publikation im Bayreuther Forum Ökologie nicht mehr erfolgte.



# Klimatologie und Deposition von Luftschadstoffen im Fichtelgebirge

**Johannes Lüers, Otto Klemm, Thomas Foken**

**Weitere Mitarbeiter:** Johannes Olesch, Christoph Thomas, Johannes Ruppert, Mathias Göckede, Corinna Rebmann, Jens-Christopher Mayer, Willi Seifert, Andreas Held, Thomas Wrzesinsky, Marc Schröter, Jörg Gerchau.

## Zusammenfassung

Das Projekt A3 befasst sich mit den physikalischen und chemischen Eigenschaften der Atmosphäre und deren zeitlicher Variation in der bodennahen Grenzschicht. Hierzu wurden zumeist vertikale Profile maßgeblicher mikrometeorologischer und luftchemischer Elemente entweder als Langzeitmessung oder während temporärer Experimente erfasst. Diese Untersuchung bezieht sich in erster Linie auf die im Rahmen der BITÖK-Forschung bearbeiteten Ökosysteme im östlichen Oberfranken und insbesondere auf Nadelwaldstandorte in Höhenlagen europäischer Mittelgebirge (600 m bis 800 m ü. NN).

Im Berichtszeitraum 2001 bis 2004 lagen die Schwerpunkte in der Messung meteorologischer Elemente einschließlich der Messung der Konzentration wesentlicher Luftschadstoffe, Aerosole und Partikel und der Interpretation der entsprechenden Verläufe. Zum einen wurde das Langzeitmessnetz weitergeführt, modernisiert und erheblich erweitert und die daraus gewonnene Datengrundlage klimatologisch ausgewertet. Zum anderen wurden temporäre Intensivmesskampagnen bzw. Experimente auf den Messflächen durchgeführt (BEWA2000: Nebel, Partikel; WALDATEM-2003: Vertikalprofile). Außerdem wurde unter Leitung der Teilprojekte A6 und A7 die Reihen der Kohlenstoff- und Wasserdampf Flüsse im Rahmen der Kohlenstoffbilanz der Station Waldstein Weidenbrunnen der Jahre 1997 bis einschließlich 2003 ergänzt. Erheblicher Aufwand zur Gewährung abgesicherter Ergebnisse verlangte die Datenqualitätsprüfung und -korrektur, die Zeitreihenkonstruktion, die Wartung und Erneuerung der Instrumentierung und die Datenfernübertragung.

## Summary

In project A3, physical and chemical properties of the atmosphere and their temporal variability in the boundary layer are studied. For this study vertical profiles of important meteorological and air quality parameters were measured either during a long time observation or during short-time experiments. Within the scope of the BITÖK background, this investigation primarily covers the considered ecosystems in the eastern parts of Upper Franconia, in particular coniferous forests at altitudes of the European low mountain range (600 m to 800 m a.s.l.). Main topics during the reporting period 2001 to 2004 were the measurement of meteorological parameters and of concentration of the main air pollutants and particulate matter and the interpretation of their corresponding progressions. At one hand, the long term measurement network was continued, upgraded and expanded and the obtained data analyzed. On the other hand, short-time experiments and campaigns were conducted at the research area (BEWA2000: fog deposition, particular matter; WALDATEM-2003: vertical profiles). Additional, the fluxes of carbon dioxide and water vapour at the Waldstein station Weidenbrunnen are completed for the years 1997 to 2003. Considerable efforts are made to hold the high quality standards regarding the quality assurance, quality control and data correction, the construction of time-series, the maintenance and instrumental upgrading and remote data transmission.

## 1. Fragestellung und Ziele des Teilprojektes

Das Projekt A3 befasst sich mit der Frage nach den maßgeblichen Austauschprozessen von Energie und Spurenstoffen zwischen Biosphäre und Atmosphäre, speziell zwischen einem Nadelwald (Norwegische Fichte, mittlere Bauhöhe 19 m) und der atmosphärischen Grenzschicht. Die Ziele lagen bei einer routinemäßigen Datenerfassung zumeist vertikaler Profile meteorologischer und luftchemischer Elemente und auf zusätzlichen experimentellen Arbeiten zur Beantwortung der Fragen am BITÖK-Standort *Waldstein* (Messturm „Weidenbrunnen“ und Messcontainer „Pflanzgarten“), am Messstandort *Voitsumra* (agarmeteorologische Station) im Fichtelgebirge und am Universitäts-Standort *Ökologisch-Botanischer Garten* (automatische Wetterstation) in Bayreuth (Tabelle 1). Einerseits wurde ein Grundstock an qualitätsgeprüften meteorologischen und luftchemischen Daten erhoben, der für eine detaillierte klimatologische und mikrometeorologische Charakterisierung der Standorte notwendig war und ist und gleichfalls eine gute Ausgangsbasis für weitergehende Experimente bot. Andererseits war es Ziel detaillierte Einzeluntersuchungen durchzuführen, die teilweise methodische Neuentwicklungen darstellten, und teilweise etablierte aber aufwändige Ansätze verwenden sollten. Diese Untersuchungen wurden durch das Projekt A3 intensiver als BITÖK-Teilprojekten und auch in externer Kooperation realisiert.

Durchgeführte Aufgaben im Berichtszeitraum 2001 und 2002:

- Messkampagne im Rahmen des BEWA2000 Forschungsverbundes „Regionale Emissionen biogener reaktiver flüchtiger organischer Verbindungen (BVOC) aus Waldbeständen“. Darin Eingebunden die Experimente zur Erfassung der Nebeldeposition (Quantifizierung des Eintrags von Wasser und ausgewählten Nährstoffen in ein Waldökosystem durch die Deposition von Nebel) und zur Erfassung der Partikeldynamik (Partikelbildungsprozesse, Größenverteilung und turbulenter Fluss).
- LIDAR-Messungen (Messungen mit dem Light Detection and Ranging System des Lehrstuhls für Technische Thermodynamik und Transportprozesse (LTTT) zur Fernerfassung der SO<sub>2</sub>-Emission des Kraftwerks Arzberg).

Durchgeführte Aufgaben im Berichtszeitraum 2003 und 2004:

- Qualitätsprüfung der über den BITÖK-Gesamtzeitraum erfassten meteorologischen und luftchemischen Messdaten, Datenkorrektur und Zeitreihenkonstruktion,
- Erstellung umfangreicher klimatologischer Auswertungen der lokalen Messungen und Einordnung in den regionalen und globalen Klimatrend,
- WALDATEM-2003 Experiment: Erfassung hoch aufgelöster Vertikalprofile Wind, Temperatur und CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Rahmen des Sommerexperimentes WALDATEM-2003 in enger Zusammenarbeit mit den Teilprojekten A6 und A7,
- Erweiterung der Reihen der Kohlenstoff- und Wasserdampf Flüsse am Standort Waldstein um die Jahre 2000 bis 2003,
- Intensivwartung und Erneuerung der installierten Instrumentierung und Datenfernübertragung und Planung der Einbindung in zukünftige, weiterführende Projektvorhaben.



## 2. Methoden

### 2.1 Standardmessprogramm 2001 bis 2004

Das BITÖK betreibt Messflächen für ökosystemare Untersuchungen (boden- und pflanzenökologisch, hydrologisch, lufthygienisch-klimatologisch) an Standorten im Fichtelgebirge (Lehestenbach-Einzugsgebiet am Waldstein und oberes Egertal bei Voitsumra) im Ökologisch-Botanischen Garten in Bayreuth und im Steigerwald. Meteorologische Messungen wurden zeitweise an zusätzlichen Standorten in der Region zur Unterstützung einzelner Forschungsvorhaben durchgeführt. Längere meteorologische Messreihen qualitätsgeprüfter Daten liegen nur von den in Tabelle 1 angegebenen Stationen vor, die nach den internationalen und nationalen Standards der Weltorganisation für Meteorologie, der Verwaltungsvorschrift TA Luft und der VDI/DIN-Richtlinien betrieben werden. Ein Teil der Daten sind im Internet für die Öffentlichkeit abrufbar (<http://www.bayceer.uni-bayreuth.de/mm/de/klima/5445/Uebersicht/>); die Gesamtdaten werden auf einer internen Datenbank professionell verwaltet.

Alle Stationen besitzen derzeit eine moderne Geberausrüstung und sind in einem guten Wartungszustand. In den Jahren 2003 und 2004 sind auch die infrastrukturellen Bedingungen, wie Datenfernübertragung, unterbrechungsfreie Stromversorgungen oder Blitzschutz deutlich verbessert worden. Eben solche Anstrengungen wurden bezüglich des Datenzuganges über die Datenbank des BITÖK/BayCEER und das Internet erreicht (Goat-Client).

**Tabelle 1:** Übersicht aktuell betriebener Messstationen, Abt. Mikrometeorologie und Klimatologie.

Name	Standort	Höhe	Betrieb	Zusatzmessungen
Bayreuth, Ökologisch-Botanischer Garten	Wiese	365 m ü. NN	Klimastation seit 1992, seit 02/2001 Komplettumbau, neu Instrumentiert	Bodenmessfeld (seit 02/2001), Strahlungsbilanz, UV-Strahlung
Waldstein, Pflanzgarten	Waldlichtung (Wiese)	765 m ü. NN	Klimastation seit 1994	Lufthygienisches Messprogramm, Diffuse Strahlung
Waldstein, Weidenbrunnen	19 m Fichtenforst	775 m ü. NN	Bestandesklima seit 1997/1998; diverse Umbauten und Modernisierungen, Schiffsregenschirm ab 2000, Zusatz-Psychrometer 0 m, 5 m, 12 m ab 04/2004	FLUXNET-Station für CO <sub>2</sub> und H <sub>2</sub> O-Flüsse seit 1997; Vertikalprofile zur Erfassung des Mikroklimas eines Fichtenforstes
Voitsumra, oberes Egertal	Grünland, Wiese	624 m ü. NN	Agrarmeteorologische Station seit 1998; Übernommen 04/2000, komplett modernisiert 10/2003	Bodenmessfeld (seit 10/2003), Strahlungsbilanz

Die folgenden Tabellen 2 bis 5 geben eine detaillierte Aufstellung der beobachteten meteorologischen und luftchemischen Messreihen an der entsprechenden Messstation. Alle Stationen wurden im Laufe der jeweiligen Betriebszeit bezüglich Geräteausstattung mehrfach modifiziert, entweder im Messprogramm erweitert (v. a. ÖBG, Weidenbrunnen) oder modernisiert (z.B. Strahlungsmessgeber).

Die Angaben in der Spalte „Betrieb seit“ entsprechen dem auf den Monat gerundeten Startzeitpunkt der Inbetriebnahme des jeweiligen, aktuellen Messgerätes. Für einige meteorologische Elemente (z.B. Strahlung Weidenbrunnen) liegen auch ältere Messreihen als hier angegeben vor (Messungen durch Modernisierung stillgelegter Messgeräte).

**Tabelle 2:** Ökologisch-Botanischer Garten (Kürzel BG), automatische Wetterstation (17 m Mast), Messprogramm 2001 bis 2004. Die Messdaten werden als 10-Minuten Mittelwerte oder Summen registriert.

BG	Kurzbeschreibung (Höhenangaben sind in Meter über Grund, Tiefenangaben in cm)	Mess-Sensor	phys. Einheit	Einheit	Datenbank-ID
Betrieb seit:	Wiese, leichter Hang, umgebender Bestand: Mischgehölz, Rabatte (Turmfundament: 365 m ü. NN)				
05/1997	Lufttemperatur 2 m	HMP45, PT 100	°C		2718
05/1997	Relative Luftfeuchte 2 m	HMP45, kapazitiv	%		2717
02/2001	Lufttemperatur 2 m (trocken)	Psychrometer PT 100	°C		36078
02/2001	Lufttemperatur 2 m (feucht)	Psychrometer PT 100	°C		36079
02/2001	Lufttemperatur bodennah 0.05 m	PT 100	°C		36077
02/2001	Bodentemperatur -05 cm	PT 100	°C		36071
02/2001	Bodentemperatur -10 cm	PT 100	°C		36072
02/2001	Bodentemperatur -20 cm	PT 100	°C		36073
02/2001	Bodentemperatur -50 cm	PT 100	°C		36074
02/2001	Bodentemperatur -100 cm	PT 100	°C		36075
02/2001	Globalstrahlung 2 m	CM 14	Wm <sup>-2</sup>		36083
02/2001	Reflexstrahlung 2 m	CM 14	Wm <sup>-2</sup>		36084
02/2001	langwellige Gegenstrahlung 2 m	CG 2	Wm <sup>-2</sup>		36085
02/2001	langwellige Ausstrahlung 2 m	CG 2	Wm <sup>-2</sup>		36086
02/2001	Gerätetemperatur 2 m GegenStr.	PT 100	°C		36087
02/2001	Gerätetemperatur 2 m AusStr.	PT 100	°C		36088
05/1997	Ultraviolettstrahlung 2 m	Thies	Wm <sup>-2</sup>		2724
05/1997	Windgeschwindigkeit 17 m (bis 02/2001 Schalensternanemometer)	Thies Ultrasonic	ms <sup>-1</sup>		2721
05/1997	Windrichtung 17 m (bis 02/2001 Windfahne)	Thies Ultrasonic	Grad		2722
02/2001	Niederschlag 1 m	Ott Pluvio	mm		2723
10/1997	Luftdruck	Ammonit AB60	hPa		2726
02/2001	Bodenfeuchte -10 cm	TDR			36081

**Tabelle 3:** Waldstein Pflanzgarten (Kürzel WP), Messcontainer, Messprogramm 2001 bis 2004. Die Messdaten werden als 10-Minuten Mittelwerte oder Summen registriert.

WP	Kurzbeschreibung (Höhenangaben sind in Meter über Grund, Tiefenangaben in cm)	Mess-Sensor	phys. Einheit	Einheit	Datenbank-ID
Betrieb seit:	Waldlichtung, Wiese. Umgebender Bestand: Nadelwald + einz. Laubbäume (Containersockel: 765 m ü. NN).				
02/1994	Lufttemperatur 2 m	HMP45, PT 100	°C		1990
02/1994	Relative Luftfeuchte 2 m	HMP45, kapazitiv	%		1986
02/1994	Globalstrahlung 4 m	CM 11	Wm <sup>-2</sup>		1988
07/1997	Diffuse Himmelstrahlung 4 m	CM 11, Schattenring	Wm <sup>-2</sup>		14476
02/1994	Windgeschwindigkeit 10 m	Thies Anemometer	ms <sup>-1</sup>		1987
02/1994	Windrichtung 10 m	Thies Windfahne	Grad		1984
02/1994	Niederschlag 1 m (Kippwaage)	OMC 212	mm		1985
02/1994	Luftdruck in Stationshöhe	Ammonit AB60	hPa		1989
05/1994	Ozon-Analysator 3 m	MLU ML 8810 M	ppb, µgm <sup>-3</sup>		1992
05/1994	SO <sub>2</sub> -Analysator 3 m	MLU ML 8850 S	ppb, µgm <sup>-3</sup>		1991
05/1994	NO <sub>x</sub> -Analysator 3 m, NO	ECO CLD 700AL	ppb, µgm <sup>-3</sup>		1995
	NO <sub>x</sub> -Analysator 3 m, NO <sub>2</sub>				1998
	NO <sub>x</sub> -Kalibrator	MLU ML 8890 JD	--		--

**Tabelle 4:** Waldstein Weidenbrummen (Kürzel WT), Messturm, Bauhöhe 32 m, Messprogramm 2001 bis 2004. Die Messdaten werden als 10-Minuten Mittelwerte oder Summen registriert.

WT	Kurzbeschreibung (Höhenangaben sind in Meter über Grund, Tiefen- angaben in cm)	Mess-Sensor	phys. Ein- heit	Datenbank- ID
Betrieb seit: Waldbestand: Nadelwald (Fichte) Baumhöhe ca. 19 m (Turmfundament: 775 m ü. NN)				
12/1998	Lufttemperatur 2 m	HMP45, PT 100	°C	14493
12/1998	Relative Luftfeuchte 2 m	HMP45, kapazitiv	%	14504
04/1998	Lufttemperatur 2 m (trocken)	Psychrometer, PT 100	°C	14492
04/1998	Lufttemperatur 2 m (feucht)	Psychrometer, PT 100	°C	14499
12/1998	Lufttemperatur 21 m	HMP45, PT 100	°C	14491
12/1998	Relative Luftfeuchte 21 m	HMP45, kapazitiv	%	14503
04/1998	Lufttemperatur 21 m (trocken)	Psychrometer, PT 100	°C	14490
04/1998	Lufttemperatur 21 m (feucht)	Psychrometer, PT 100	°C	14498
12/1998	Lufttemperatur 31 m	HMP45, PT 100	°C	14488
12/1998	Relative Luftfeuchte 31 m	HMP45, kapazitiv	%	14501
04/1998	Lufttemperatur 31 m (trocken)	Psychrometer, PT 100	°C	14487
04/1998	Lufttemperatur 31 m (feucht)	Psychrometer, PT 100	°C	14496
05/1996	Lufttemperatur 31 m	Thies Haarhygrometer	°C	2688
05/1996	Relative Luftfeuchte 31 m	Thies Haarhygrometer	%	2701
04/1998	Bodentemperatur -05 cm	PT 100	°C	14479
04/1998	Bodentemperatur -10 cm	PT 100	°C	14478
04/1998	Bodentemperatur -20 cm	PT 100	°C	14480
04/1998	Bodentemperatur -50 cm	PT 100	°C	14481
05/1999	Bodenwärmestrom 1	Rimco HP	Wm <sup>-2</sup>	14483
05/1999	Bodenwärmestrom 2	Rimco HP	Wm <sup>-2</sup>	14485
05/1999	Bodenwärmestrom 3	Rimco HP	Wm <sup>-2</sup>	14486
04/1998	Globalstrahlung 30 m	CM 14	Wm <sup>-2</sup>	14517
04/1998	Reflexstrahlung 30 m	CM 14	Wm <sup>-2</sup>	14518
04/1998	langwellige Gegenstrahlung 30 m	CG 2	Wm <sup>-2</sup>	14513
04/1998	langwellige Ausstrahlung 30 m	CG 2	Wm <sup>-2</sup>	14514
04/1998	Gerätetemperatur 30 m (Gegenstr.)	PT100 CG 2	°C	14522
04/1998	Gerätetemperatur 30 m (Ausstr.)	PT100 CG 2	°C	14523
04/2000	Windgeschwindigkeit 02 m	Friedrich Anemometer	ms <sup>-1</sup>	14507
04/2000	Windgeschwindigkeit 10 m	Friedrich Anemometer	ms <sup>-1</sup>	2693
04/2000	Windgeschwindigkeit 16 m	Friedrich Anemometer	ms <sup>-1</sup>	2694
08/2000	Windgeschwindigkeit 18 m	Friedrich Anemometer	ms <sup>-1</sup>	2695
04/1998	Windgeschwindigkeit 21 m	Friedrich Anemometer	ms <sup>-1</sup>	14506
04/1998	Windgeschwindigkeit 25 m	Friedrich Anemometer	ms <sup>-1</sup>	2697
07/1997	Windgeschwindigkeit 32 m	Friedrich Anemometer	ms <sup>-1</sup>	2698
07/1997	Windrichtung 32 m	Skye W200P	Grad	2691
11/2000	Windgeschwindigkeit 32 m	Thies Ultrasonic	ms <sup>-1</sup>	14725
11/2000	Windrichtung 32 m	Thies Ultrasonic	Grad	14726
01/2000	Niederschlag 32 m (Trichter)	Schiffsregenschirm SRM	mm	14711
01/2000	Niederschlag 32 m (Seite)	Schiffsregenschirm SRM	mm	14712
09/2000	Sichtweite 21 m	PWD 11	m	14836
11/2002	Wetter-Code 21 m	PWD 11	—	38651
05/2003	Windvektor, Schalltemperatur 33 m	Ultrasonic R3-50, Gill	ms <sup>-1</sup> , °C	
-/1997	Windvektor, Schalltemperatur 22 m (33 m bis 05/2003)	Ultrasonic R2, Gill	ms <sup>-1</sup> , °C	
04/2002	CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O Konzentration 33 m	LiCor 7500 (open)	mmol m <sup>-3</sup>	
-/1997	CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O Konzentration 22 m (33 m bis 04/2002)	LiCor 6262 (closed)	mmol m <sup>-3</sup>	

**Tabelle 5:** Voitsumra, oberes Egertal (Kürzel VS), agrarmeteorologische Messstation (2 m Mast) Messprogramm 2001 bis 2004. Die Messdaten werden ab 04/2000 als 10-Minuten Mittelwerte oder Summen registriert (davor 30 min Werte).

VS	Kurzbeschreibung (Höhenangaben sind in Meter über Grund, Tiefen- angaben in cm)	Mess-Sensor	phys. Ein- heit	Datenbank- ID
Betrieb seit: offene Wiese, eben, Talsohle, 624 m ü. NN				
05/1998	Windgeschwindigkeit 2 m	Vector Anemometer	ms <sup>-1</sup>	14534
05/1998	Niederschlag	OMC 212	mm	14535
05/1998	Relative Luftfeuchte 2 m	HMP45, kapazitiv	%	14536
05/1998	Lufttemperatur 2 m	HMP45, PT 100	°C	14537
05/1998	Windrichtung 2 m	Vector Windfahne	Grad	14538
04/2000	langwellige Gegenstrahlung 2 m	CNR1	Wm <sup>-2</sup>	14729
04/2000	langwellige Ausstrahlung 2 m	CNR1	Wm <sup>-2</sup>	14730
04/2000	Globalstrahlung 2 m	CNR1	Wm <sup>-2</sup>	14731
04/2000	Reflexstrahlung 2 m	CNR1	Wm <sup>-2</sup>	14732
10/2003	Batteriespannung	—	V	117978
04/2000	Gerätetemperatur 2 m	CNR1	°C	14543
10/2003	Lufttemperatur bodennah 0.05 m	PT 100	°C	117912
10/2003	Bodentemperatur -05 cm	PT 100	°C	117911
10/2003	Bodentemperatur -10 cm	PT 100	°C	117906
10/2003	Bodentemperatur -25 cm	PT 100	°C	117907
10/2003	Bodentemperatur -50 cm	PT 100	°C	117908

### 2.1.1 Datenkorrektur, Datenqualitätsprüfungen, Zeitreihenkonstruktion

Das Datenmanagement ist nach der empirischen Erfassung der Daten ein wesentlicher Bestandteil wissenschaftlicher Arbeiten. Die Stichpunkte 1 bis 4 der Tabelle 6 skizzieren das methodische Vorgehen der Datenaufbereitung, die Stichpunkte 5 bis 9 die Methoden der Datenauswertung im Projekt A3. Nach der Datensicherung sind die Korrektur und die Plausibilitätsprüfung der Messdaten die entscheidenden Schritte zur Beurteilung der Qualität und der daraus resultierenden Verwendbarkeit der Messungen (Foken, 2003a).

Für diese personal- und kostenintensive Leistung standen hinsichtlich einer Onlinekorrektur von Einzelwerten erst seit 2003 der auf Internetbrowser basierte Goat-Client zur Verfügung.

Zur Schließung längerer Datenlücken und zur Prüfung der physikalischen Plausibilität der Daten fanden visuelle und mathematisch-statistische Verfahren Verwendung.

Zum Prozessverständnis z.B. der Dynamik oder Variabilität und für prognostische Fragestellungen war die Bildung von längeren, auch zeitlich aggregierten Zeitreihen aus geprüften Einzelmessungen notwendig. Neben der Kontinuität der Zeitreihe war die Feststellung von Inhomogenitäten (z.B. Test nach Alexandersson 1986) zur Beurteilung der Qualität von Bedeutung.

Aufgrund hohen Arbeitszeitaufwandes konnten diese Schritte nur für Einzelzeiträume und für nach Bedarf ausgewählte Elemente und Parameter durchgeführt werden. Eine systematische Aufbereitung aller Messreihen aller Stationen war nicht leistbar.

**Tabelle 6:** Ablauf der Datenaufbereitung und Datenauswertung im Projekt A3.

Methode	Detail	Stand 2004	Problem
1) Datensicherung	Halbautomatische Sicherung durch die BITÖK-Datenbank (Datenfernübertragung)	realisiert	veraltete Datenfernübertragung
2) Datenkorrektur	a) Onlinekorrektur (Einzelwerte: Goat-Client) b) Offlinekorrektur (z.B. Differenzenverfahren)	a) seit 2003 kontinuierlich b) erfolgt für Einzelzeiträume nach Bedarf	hoher Zeitaufwand für systematische Aufbereitung der Messdaten bis 2003
3) Datenqualität	Plausibilitätsprüfungen	erfolgt ab 2003, davor erfolgt für Einzelzeiträume nach Bedarf	hoher Zeitaufwand für systematische Aufbereitung der Messdaten bis 2003
4) Zeitreihenkonstruktion	Aggregierung, Homogenisierung	erfolgt für Einzelzeiträume und ausgewählte Parameter	hoher Zeitaufwand für systematische Aufbereitung der Messdaten bis 2003
5) Mittelwertsstatistik	Tages-, Dekaden-, Monats-, Saison-, Jahreswerte	ÖBG 1998 bis 2004; andere Stationen: für Einzelzeiträume	Datenplausibilität Datenlücken
6) Extremwertstatistik	Anomalien, Ausreißer, Perzentile, Schwellenwertüber- und -unterschreitungen	für Einzelzeiträume und ausgewählte Parameter	Datenplausibilität Datenlücken
7) Häufigkeitsanalyse	Verteilungsfunktionen, Andauern, Eintrittswahrscheinlichkeit		
8) Zeitreihenanalyse	lineare, nichtlineare Trends; Glättung (Filter); Auto-, Kreuzkorrelation; Spektralanalyse, Wavelet-Analyse		
9) Regressionsmodelle	Spezielle Clusteranalysen; Referenzzeitreihen; Parametrisierung; Flächeninterpolation; Prognose (Extrapolation)	ab 2005	Verfügbarkeit von entspr. Software

### 2.1.2. Wartung und Erneuerung der Instrumentierung

In den Berichtsjahren 2003 und 2004 musste zur Aufrechterhaltung des Routinemessbetriebes aller meteorologischen und luftchemischen Stationen ein ständiger, Teils erheblicher Wartungseinsatz erfolgen. Der nicht unerheblich hohe Anteil an Messgerätedefekten in den Jahren 2002 und 2003 und eine mit dem Personalwechsel 2003 sowohl im wissenschaftlichen als auch im technischen Verantwortungsbereich verbundene fachliche Umorientierung zwang zu einer arbeits- und kostenintensiven Reparatur bzw. Erneuerung der Instrumentierung (z.B. am Standort Voitsumra od. Messcontainer Pflanzgarten). Dies hatte in den Berichtsjahren 2002 und 2003 teilweise größere Datenausfälle zur Folge.

Durch den Wartungseinsatz 2003 und 2004 konnte die Messbereitschaft aller Stationen aufrechterhalten bzw. wieder hergestellt werden. Die Tabelle 7 gibt einen Überblick auf den Wartungsstand und auf die wichtigsten Betriebsvorgänge und einen groben Auszug bezüglich der Datenqualität 2003/2004.

Für eine längerfristige Aufrechterhaltung oder eine Erweiterung des Messbetriebes muss zukünftig jedoch v. a. im Bereich der EDV-gestützten Datenaufzeichnung (Logger) und der vollautomatischen Datenfernübertragung zwecks Datensicherung und Datenkontrolle mit einer erheblichen Investition (Personal- und Finanzbedarf) gerechnet werden.

**Tabelle 7:** Messstationen des Projektes A3, Wartungsstand, Betriebsvorgänge und Datenqualität für 2003 und 2004.

Stationsname	Kürzel	Wartungsstand Okt. 2004	Betrieb 2003/04	Datenqualität 2001 bis 2004
1) Bayreuth Öko.-Bot. Garten: Automatische Wetterstation	BG	Wartungszustand: Nach Wartungseinsatz Jun03 einwandfrei.	Reparatur Pluvio Okt03 bis Mrz04. Neue Schneelatte. Unabhängige Stromversorgung (USV). 20 m Erdungsband im Erdreich erneuert. Aufbau WLAN-Anschluss.	Niederschlag Ott Pluvio: Hersteller bedingter Gerätefehler unentdeckt bis Mitte 2003, Daten 2001 bis 2003 korrigiert. Gerät repariert ab Mrz04 (Ersatz d. Kippwaage). Strahlung: Messfehler Jan-Mrz03, keine Korrektur möglich. Restliche Daten: Kleinere Ausfälle.
2) Waldstein, Pflanzgarten Messcontainer	WP	Wartungszustand: Nach Wartung Nov03 Gerätezustand in Ordnung. Wartungsbedarf f. Containersockel (neue Fußbefestigungen nötig).	Blitzschutzinstallation. Aufbau Strahlungsbock. Mehrfache Reparatur Luftchemie komplett. Neue Schneelatte. Unabhängige Stromversorgung. Reparatur Messcomputer.	Luftchemie: NO <sub>x</sub> , O <sub>3</sub> : Zwischen Sommer 2002 und 4.11.2003 Fehler durch nicht verschlossenes Ansaugrohr! Behoben 4.11.03. SO <sub>2</sub> generell hoher Korrekturbedarf. Meteorologische Werte weitgehend in Ordnung. Diffuse Str.+ Globalstrahlung: Korrekturbedarf.
3) Waldstein, Weidenbrunnen Messturm	WT	Wartungszustand: Nach Sommerexperiment 2003 einwandfrei. Neuverlegung Kabeltrasse und Erweiterung Blitz- und Überspannungsschutz notwendig.	3 zusätzliche Psychrometer. Reinigung SRM Jul03-Sep03. Austausch HMP45 auf 31 m. Thies2D-Sonic Reparatur Apr-Aug03. Reparatur PWD. Stilllegung Lastaufzug Turm. Neue Schutzhütten für Stromversorgung und Logger und USV.	Niederschlag Schiffsregenschirm (SRM): sehr hoher Korrekturaufwand der Werte. Bodenwärmepplatten: Werte generell fehlerhaft. Restliche Werte: Korrekturbedarf.
4) Voitsumra Automatische Wetterstation	VS	Wartungszustand: Nach Wartungseinsatz Sep-Okt03 einwandfrei	Neuinstallation Bodentemperaturen & neues Loggerprogramm 17.10.03. Neue Schneelatte.	Fehlerhafte Datenabspeicherung Strahlung (CNR1). Komplettausfall Bodentemperaturen bis 17.10.03 (seit Dez01). Restliche Daten: Korrekturbedarf.

## 2.2 Luftchemische und klimatologische Auswertungen

Neben den aktuellen meteorologischen Messwerten benötigen die Untersuchungen auf den Testflächen und die Laborexperimente in der Regel nicht nur die klassischen mittleren Klimaparameter und Konzentrationswerte, sondern abgeleitete Größen (Schwellenwerte, Ereignistage, Grenzwerte) und zusammengesetzte Klima- und Luftgüteindikatoren bzw. Klima- und Luftqualitätsindizes (z.B. Trockenstressindizes) oder – als Klimaindikator verwendbare – Daten wie phänologische Beobachtungen oder biodiverse Erhebungen. Neben der klassischen Mittelwertsklimatologie (Tages-, Dekaden-, Monats-, Saison-, Jahreswerte) sind für eine detaillierte Charakterisierung des Klimas und der Luftqualität und für die Erarbeitung von ökosystemahlen Steuergrößen Extremwertstatistiken, Häufigkeitsanalysen, Zeitreihenanalysen und der Einsatz diverser Regressionsmodelle Stand der Forschung (vgl. Tabelle 6). Nach der Abarbeitung der Punkte 1 bis 4 der Tabelle 6 ist v. a. die Zeitreihenanalyse ein wichtiges Werkzeug zur Erfassung der zeitlichen Variabilität der gemessenen oder abgeleiteten Parameter. Für Zeitreihenanalysen werden heute in erster Linie die Methoden der Trendanalyse (lineare oder polynomische Trends), die Verfahren zur Zeitreihenglättung (gleitende Mittel, Tief- und Hochpassfilterung) und nichtparametrische, bivariate und multivariate Regressionen und Korrelationen (Rang-, Kreuz- und Autokorrelationen, Spektralanalysen) angewandt (Rapp 2000; Schönwiese 2000; Wilks 1995). Die "Statistische Programmbibliothek" des Potsdam Institutes für Klimafolgenforschungen (Österle et al. 1999) ist dabei anerkanntes Hilfsmittel. Um herauszufinden, wie deutlich sich die Trends von der Zeitreihenvariabilität herausheben, wird häufig auf den Trendtest nach Mann (1945), modifiziert nach Kendall (1970), zurückgegriffen. Mit diesen Methoden ist es möglich, Extremwerte und Trends gegenüber dem allgemeinen Klimarauschen zu erkennen (Staeger et al., 2003), um nichtlineare Veränderungen richtig bewerten zu können. Für die statis-

tischen Untersuchungen kommen Wavelet-Analysen (Torrence u. Compo, 1998) zum Einsatz, die bereits auch zur statistischen Bewertung von Klimamodellergebnissen eingesetzt wurden (Handorf et al., 1999).

### **2.3 AFO2000-Verbundprojekt BEWA 2000 – Experimente 2001 und 2002**

Das Projekt war ein zentrales Element des Forschungsverbundes "Regionale Emissionen biogener reaktiver flüchtiger organischer Verbindungen (BVOC) aus Waldbeständen: Prozessstudien, Modellierung und Schließungsexperimente" (kurz: BEWA 2000, Steinbrecher, et al., 2004a, 2004b; Klemm et al, 2005; Held et al. 2002).

Der Forschungsverbund BEWA 2000 umfasste über 16 Projektpartner und wurde vom Fraunhofer-Institut für Atmosphärische Umweltforschung (IFU) in Garmisch-Partenkirchen koordiniert. Das Ziel des am BITÖK durchgeführten Teilprojekts war, zur quantitativen Beschreibung der Bildung und Emission von biogenen Emissionen reaktiven Kohlenwasserstoffen entscheidend beizutragen.

Grundlage für die Experimente am Waldstein (Kapitel 7.5) war die Überlegung, dass einige der aus den Waldbeständen emittierten BVOC mit atmosphärischem Ozon reagieren können und kondensierbares Material bilden. Durch homogene Nukleation kann es folglich zur Neubildung sekundären atmosphärischen Partikelmaterials kommen. Untersuchungen zeigen, dass über Koniferenwäldern nach Sonnenaufgang sehr kleine Partikel (3 nm) spontan auftreten können (Mäkelä et al., 1997). Dies wird auf die verstärkte Emission von BVOC nach Öffnung der Stomata und anschließender Reaktion mit atmosphärischem Ozon und Partikelneubildung begründet. Allerdings zeigten Untersuchungen ebenfalls (Buzorius et al., 1998; Buzorius, pers. comm. 2000), dass genau zu denjenigen Zeiten, zu denen anscheinend derartige Nukleations-Events beobachtbar sind, die Partikelflüsse nach unten (also zur Vegetation hin) gerichtet sind. Dies scheint ein Widerspruch zu sein, der bislang nicht endgültig aufgeklärt ist. Für den Nukleationsvorgang typische Reaktionszeiten scheinen für diesen Vorgang von sehr großer Bedeutung zu sein. Unserem Wissen nach wurde in Mitteleuropa bisher nicht versucht, Nukleations-Events über Koniferen-Wäldern nachzuweisen und parallel dazu den vertikalen Austausch von Partikeln zwischen Atmosphäre und Vegetation zu bestimmen. Dies galt ebenso für eine zusätzliche Messung des vertikalen Ozonflusses unter ebendiesen Bedingungen.

### **2.4 Nebeldeposition**

Der Nebel gebundene Eintrag von Wasser und Spurenstoffen kann in den Bergwäldern Mitteleuropas eine wichtige Rolle spielen. Die Quantifizierung dieses Eintrags stieß jedoch in der Vergangenheit auf messtechnische Grenzen. Nach der Entwicklung und Erprobung eines Systems aus einem Tropfenspektrometer zur schnellen Messung der Größenverteilung (40 Tropfengrößenklassen zwischen  $\varnothing 1.5 \mu\text{m}$  und  $50 \mu\text{m}$ ) im Nebel und einem Ultraschallanemometer zur Bestimmung des vertikalen Windes konnten im Experiment an der Ökosystemmessstation Waldstein Weidenbrunnen von April 2001 bis März 2002 Messungen zur Quantifizierung des Eintrags von Wasser und ausgewählten Nährstoffen in das Waldökosystem durch die Deposition von Nebel durchgeführt werden (Wrzesinsky, 2004; 2002).

Zusätzlich wurden die Sichtweite und die chemische Zusammensetzung (pH, elektrische Leitfähigkeit,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  und  $\text{PO}_4^{3-}$ ) des Nebelwassers gemessen. Zur Sammlung von Nebelwasser wurde ein aktiver beheizbarer Nebelsammler entwickelt und parallel zu den Wasserflussmessungen eingesetzt. Die Proben wurden automatisch alle acht Stunden genommen. Die Sammelmengen betrugen im Median 249 ml und erlaubten die gewünschten chemischen Analysen. Im Untersuchungszeitraum waren 223 Nebeltage zu verzeichnen. Der Nebelanteil betrug 25.7 %. Für die Qualitätskontrolle der gemessenen Flüsse

wurden die Daten auf Stationarität und Turbulenz überprüft und der Datensatz entsprechend angepasst.

Für die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung des Nebels war es notwendig, Proben des Nebelwassers zu nehmen. Die Sammlung von Nebelwasser ist aber nicht trivial, es mussten zahlreiche Fragen bedacht werden (Wrzesinsky, 2004). Aufgrund der vorangegangenen Erfahrungen (Wrzesinsky & Klemm, 2000) war der Bau eines „Standard“-Nebelsammlers nicht praktikabel, es konnten jedoch die wesentlichsten Punkte umgesetzt werden:

1. Es wurde nur Nebelwasser gesammelt. Für ein weiteres Experiment (Grießbaum, 2002) wurde auch interstitielles Aerosol beprobt. Dazu war ein modularer Aufbau des Sammlers notwendig. Die Verunreinigung des Sammlers zwischen Nebelereignissen konnten minimiert werden.
2. Eine Nachbildung natürlicher Vorgänge war zu komplex, um realisiert zu werden.
3. Der Bereich natürlicher Tropfenspektren konnte umfassend beprobt werden.
4. Eine tropfengrößenspezifische Sammlung war im Rahmen des Projektes technisch nicht realisierbar gewesen.
5. Ein Limit für den Stromverbrauch bestand praktisch nicht. Der Sammler konnte auch von einer Person montiert werden.
6. Der Messzeitraum umfasste auch den Winter (Sammler beheizbar).
7. Um eine gewisse Mindestsammelmenge und eine ereignisabhängige Unterscheidung zu gewährleisten, war eine Auflösung von 6 h bis 8 h je Probe notwendig.
8. Der Sammler konnte chemisch weitgehend inert und die Absorptivität möglichst gering gehalten werden.

Bei den vorhergehenden Messungen am Waldstein (Wrzesinsky & Klemm, 2000) kam ein aktiver Nebelwassersammler des Typs „Caltech Active Strand Cloudwater Collector“ (CASCC) (Daube et al., 1987; Demoz et al., 1996) zum Einsatz. Da dieser Sammler die Kriterien gut erfüllt, wurde ein neuer Sammler nach diesem Vorbild gebaut. Wichtigste Modifikation war die Möglichkeit, den Sammler zu beheizen, um ihn auch im Winter einsetzen zu können.

Der am BITÖK entwickelte, neue Sammler wird als „Bayreuth Heatable Active Strand Cloudwater Collector“ (BCC) bezeichnet (Abbildung 1), um seine veränderten Eigenschaften deutlich zu machen. Das Sammelprinzip dieses Typs eines Aktivkollektors besteht im Abscheiden der Nebeltropfen an dünnen Fäden (Nebelsaiten), die in mehreren Harfen hintereinander angebracht sind, um so den Wirkungsgrad zu erhöhen. Die nebelhaltige Luft wird dabei mittels eines Ventilators über die Harfen gesaugt, um so die beprobte Luftmenge zu erhöhen. Die Nebeltropfen können aufgrund ihrer Trägheit der die Harfen durchströmenden Luft nicht mehr folgen und impaktieren an den Nebelsaiten. Die so gewonnenen Tropfen laufen an den Saiten nach unten in einen Sammelblock und aus diesem in ein Sammelsystem.





**Abbildung 1:** Der BCC-Nebelsammler auf dem Messturm Weidenbrunnen. Links das Ventilatorteil, in der Mitte das Zusatzmodul zur Sammlung interstitiellen Aerosols, rechts das Sammelteil mit der Schutzhaube (Wrzesinsky, 2004).

## 2.5 Partikelmessungen am Waldstein, turbulenter Austausch, Bildung und Wachstum atmosphärischer Partikel über einem Fichtenwald

Im Rahmen des AFO2000-Verbundprojekts BEWA 2000 (Regionale Emissionen biogener reaktiver flüchtiger organischer Verbindungen (BVOC) aus Waldbeständen; Steinbrecher et al., 2004) wurde 2001 ein Eddy-Kovarianz-System zur direkten Messung turbulenter Partikelanzahlflüsse aufgebaut. Dieses System bestehend aus einem Ultraschallanemometer und zwei Kondensationspartikelzählern wurde im Sommer 2001 und 2002 erfolgreich im Feld eingesetzt (Held und Klemm, 2005).

Um Partikelbildungsereignisse zu identifizieren wurde in Kooperation mit dem Institut für Troposphärenforschung (IfT Leipzig) die Partikelgrößenverteilung im Größenbereich von 3 nm bis 800 nm unter Einsatz eines Differential Mobility Particle Sizer (DMPS; Birmili et al., 1999) kontinuierlich gemessen. Die vertikalen Flüsse von Partikeln („Anzahl-Flüsse“ in zwei Größenklassen) wurden mit einem neu entwickelten Eddy-Kovarianz-Setup erfasst.

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Anorganische und Analytische Chemie der Justus-Liebig-Universität Gießen wurde eine neuartige mikrometeorologische Methode realisiert, die das Potential besitzt, den Turbulenzfluss individueller chemischer Spezies in der Partikelphase direkt zu messen.

Das „Irregular Disjunct Eddy Sampling“ (IDES) kombiniert die instantane Messung der chemischen Zusammensetzung von Einzelpartikeln mit Hilfe eines Flugzeit-Massenspektrometers (TOF-MS), die zeitlich hoch aufgelöste Vertikalwindmessung mit einem Ultraschallanemometer sowie ein innovatives Auswerteverfahren zur statistischen Interpretation der Daten. Im Rahmen einer Feldmessung im Mai 2002 konnte die grundsätzliche Eignung des Verfahrens gezeigt werden (Held et al., 2003; Held, 2004). Durch Kombination des *Disjunct-Eddy-Sampling* mit *Flugzeit-Massenspektrometrie* zur Einzelpartikelanalyse wurden Grundlagen eines innovativen Ansatzes zur direkten Bestimmung turbulenter Flüsse individueller Partikelkomponenten geschaffen.

## 2.6 LIDAR-Messungen zur Bestimmung von SO<sub>2</sub>-Emissionen

Das mit LIDAR (Light Detection And Ranging) und SODAR (Sound Detection And Ranging) ausgestattete Fernmesssystem des Lehrstuhls für Technische Thermodynamik und Transportprozesse (LTTT) wurde zur Bestimmung der SO<sub>2</sub>-Emission des Kraftwerks Arzberg eingesetzt. Die Messungen fanden aus einer Entfernung von rund 1000 m zur Rauchfahne bei Voll- und Teillastbetrieb des Kraftwerks statt. Hierbei wurde in Absprache mit dem Kraftwerk-Betreiber der Bypass der Rauchgasreinigungsanlage für ein paar Stunden aktiviert, da andernfalls die SO<sub>2</sub>-



Emissionen unterhalb der Nachweisgrenze des LIDAR liegen. Die Quantifizierung der SO<sub>2</sub>-Flüsse und ihrer Unsicherheiten erfolgte aus einer Serie von LIDAR-Messungen der Konzentration und Ausdehnung der Rauchfahne sowie SODAR-Messungen der Windrichtung und -geschwindigkeit.

**Abbildung 2:** Mobiles LIDAR/SODAR-Messsystem vor dem Kraftwerk Arzberg (Schröter et al., 2003).

## 2.7 WALDATEM-2003 Experiment Sommer 2003

Ergänzend zu den Routinemessungen am Standort Weidenbrunnen vor allem bezüglich der CO<sub>2</sub>-Flussmessungen im FLUXNET-Netzwerk (Rebmann, 2004, Rebmann et al., 2004) und am 200 m entfernt liegenden Standort Pflanzgarten bezüglich der Erfassung von O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> am Messcontainer (Klemm und Lange 1999, Klemm et al. 2004) und ergänzend zu den langfristigen, klimatischen Untersuchungen einzelner Zeitreihen im Beobachtungsgebiet Fichtelgebirge/Bayreuth (Foken 2003c und Foken und Lüers 2003) wurden während des Experimentes WALDATEM-2003 die Vertikalprofilmessungen zur Erfassung der zeitlich auf 10 Minuten gemittelten Lufttemperaturen und Luftfeuchten durch zusätzliche Geber (Psychrometer nach Frankenberger) auf sechs Messhöhen im und über dem Waldbestand erweitert und seit Frühling 2004 ins Standardprogramm übernommen. Zur Abschätzung der Oberflächentemperaturen am Waldboden wurde zusätzlich der langwellige Strahlungsfluss in 4.6 m ü. G. im Stammraum bestimmt und mit einem Emissionskoeffizienten  $\varepsilon = 0.99$  in Temperaturen zurückgerechnet.

Zur Messung horizontaler Windgeschwindigkeiten (10 min Mittel) im und über dem Bestand wurden sieben Schalensternanemometer (T. Friedrichs GmbH & Co., Windgeschwindigkeitsgeber 4034) in den Messhöhen 2 m, 10 m, 16 m, 18 m, 21 m, 25 m und 32 m ü. G. eingesetzt. Im Bereich der Kronenoberkante (19 m) wurden die Messhöhen enger gesetzt, um den entscheidenden Umkehrpunkt im Windprofil optimal auflösen zu können. Zur kontinuierlichen Bestimmung des Verlaufes der mittleren Kohlendioxidkonzentration in und über dem Wald wurden am Hauptturm in den Messhöhen 0.03 m, 0.30 m, 0.90 m, 2.25 m, 5.25 m, 15.0 m, 21.6 m und 32.6 m ü. G. Gasansaugleitungen installiert, die an einen zentralen Gasanalysator (Li-Cor Inc., Li-820) angeschlossen wurden. Hier wurden die Messhöhen zur besseren Erfassung des starken bodennahen Vertikalgradienten in den ersten 6 m des Profils höher aufgelöst. Diese Profilanlage wurde an der Abteilung Mikrometeorologie selbst entwickelt. Eine umfassende Dokumentation des Experimentsdesigns von WALDATEM-2003 findet sich bei Thomas et al. (2004b). Die erfassten Datenreihen wurden routinemäßig einer täglichen, groben Online-Korrektur unterzogen und nach dem Experimentabschluss nach intensiver QA/QC und nach bestmöglicher Datenlückenschießung zur Auswertung freigegeben.

Durch unterschiedliche Messhöhen und Höhenauflösung bei der synchronisierten Messung der Wind-, Lufttemperatur und Kohlendioxid-Profile bot sich eine einheitliche Interpolation der Zwischenwerte der jeweiligen Stützpunkte an. Zum Einsatz kam die Methode nach Akima (1970). Diese erlaubt eine Vermeidung typischer Interpolationsartefakte am unbekannten Rand der eindimensionalen Vertikalprofile. Für die Interpolation der zeitlichen Zwischenwerte kam ein einfacher, symmetrischer Glättungsalgorithmus zum Einsatz. Mit diesem Vorgehen konnten räumlich und zeitlich kontinuierliche, zweidimensionale Datenmatrizen bzw. Diagramme und animierte Filmsequenzen der vertikalen Verteilung der entsprechenden meteorologischen Parameter im Fichtenforst für die Experimentlaufzeit gewonnen werden.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Repräsentativität Standort Waldstein

##### Überblick und Bedeutung der Messflächen des BITÖK



Die Messflächen am Waldstein (incl. Vorgängermessflächen) zur Untersuchung komplexer ökosystemarer Prozesse existieren inzwischen mehr als 15 Jahre. Es stehen nunmehr Wissen und Daten zur Verfügung, wie sie in Deutschland fast einmalig sind. Nur wenige Standorte in Europa können Ähnliches vorweisen (Göttingen, Freiburg, Tharandt). Jedoch liegen diese Stationen in deutlich niedrigeren Höhenlagen von nur 200 m bis 400 m ü. NN und damit in einem klimatologisch weit weniger sensiblen Bereich als die Messflächen der Universität Bayreuth im hohen Fichtelgebirge. Eine derartige Basis ist Grundlage für Forschungsanträge in der Gegenwart und der Zukunft und macht neben der Paarung einer fachlicher Kompetenz und einer unwiederbringlichen Datenbasis den Standortvorteil von Bayreuth aus.

Nebenstehende Abbildung zeigt den Messturm am Waldstein Weidenbrunnen während eines Messeinsatzes 2004. Der 32 m hohe Messturm ist Bestandteil intensiver Untersuchungen mikrometeorologischer und mikroklimatischer Fragen.

**Abbildung 3:** 32 m hoher Messturm am Waldstein Weidenbrunnen (775 m ü. NN), Fichtenforst.

Er dient der Erfassung und Beschreibung atmosphärischer Energie- und Stoffflüsse und kohärenter Strukturen innerhalb und oberhalb eines Nadelwaldes.

Der Turm ist eingebunden als internationale Waldklima- und FLUXNET-Station DE-Wei Weidenbrunnen (50°08'53" N; 11°52'00" E, Turmfundament: 775 m ü. NN). Die Messstation liegt nahe des Großen Waldsteins (877 m ü. NN) auf dem bewaldeten Höhenzug des Fichtelgebirges in einem rund 19 m hohen Fichtenforst. Durch die Verwendung von schnellen (sec) und mittelschnellen (min) Messtechniken (vgl. Tabelle 4) ist es möglich, die atmosphärischen Flüsse und die Dynamik des Austausches zwischen Wald und atmosphärischer Grenzschicht übergreifend zu beobachten und auf verschiedenen zeitlichen Skalen zu erfassen und zu vergleichen.

Die routinemäßige Langzeitmessung am Standort Weidenbrunnen und Pflanzgarten garantiert für maßgebende mikrometeorologische Elemente und abgeleitete Parameter eine kontinuierliche Beobachtung des jeweiligen zeitlichen Verlaufs entlang eines Vertikalprofils innerhalb und oberhalb eines mitteleuropäischen Nadelwaldbestandes (Lüers et al., 2004). Sie liefert gleichzeitig einen wichtigen Beitrag zur Interpretation der atmosphärischen Flüsse, die speziell durch die am Messturm Weidenbrunnen installierte Turbulenzmesstechnik erfasst werden (Thomas et al, 2004b).

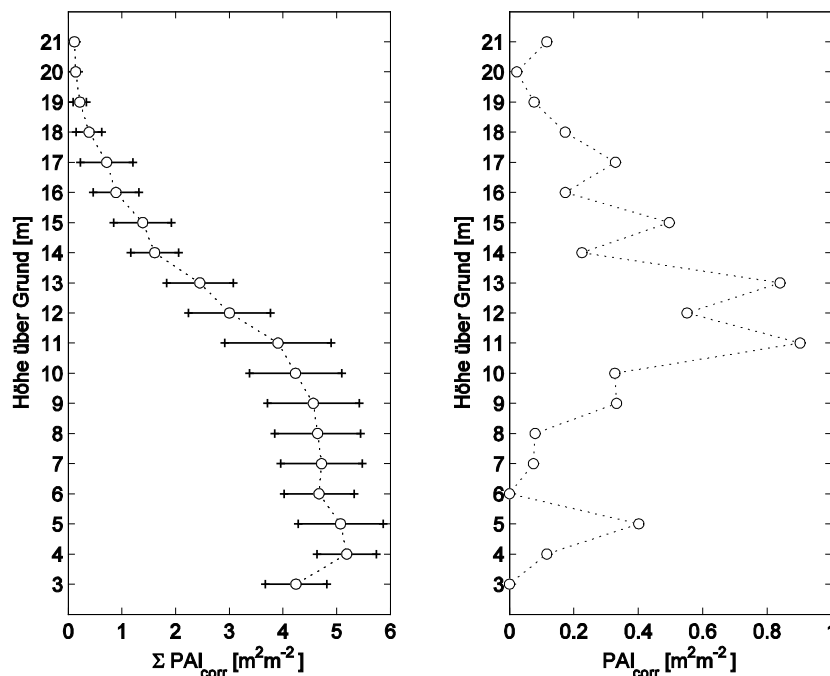
Der mittlere Verlauf der Horizontalwindgeschwindigkeit wird mit einem Vertikalprofil aus sieben robusten Schalensternanemometern (T. Friedrichs GmbH & Co.) gemessen. Die Messhöhen 2 m, 10 m, 16 m, 18 m liegen innerhalb des Baumbestandes, die Höhen 21 m, 25 m und 32 m oberhalb der Baumkronen. Im Bereich der Kronenoberkante (19 m) sind die Messhöhen enger

gesetzt, um den entscheidenden Umkehrpunkt im Windprofil optimal auflösen zu können.

Die Vertikalprofilmessungen der Temperatur und der Feuchte geschieht durch einen parallelen Einsatz sechs aktiv ventilerter Psychrometer (T. Friedrichs GmbH & Co.) in 0.1 m, 2.0 m, 5.5 m, 12.5 m, 21.0 m und 32.0 m Messhöhe und drei passiv ventilerter Temperatur- und Feuchtegeber (Vaisala GmbH, HMP45a).

Diese Vertikalprofilmessungen ermöglichen die Erfassung des komplexen Stabilitätsregimes in und über dem Wald und lassen somit in Kombination mit den Flussmessungen und den Eigenschaften kohärenten Strukturen Rückschlüsse auf Kopplung und Entkopplungszuständen zwischen Wald und Atmosphäre zu. Ergänzt wird das Profil durch Messung der Bodentemperatur (Pt 100). Es zeigte sich durch eine detaillierte Bodenwärmestromberechnung für die Station Waldstein Weidenbrunnen für den Zeitraum des Experiments WALDATEM-2003, dass der Bodenwärmestrom aus Profilmessungen der Bodentemperatur und Bodenfeuchte abgeschätzt werden kann. Es ergab sich konkret der für einen Wald typische Verlauf mit kleinen Amplituden (typische Werte während des Tages:  $50 \text{ W m}^{-2}$ ). Parallel wurde ein einfacher Ansatz gerechnet (Bodenwärmestrom = 5 % der Strahlungsbilanz). Beide Ansätze stimmen erstaunlich gut überein. Somit kann der Bodenwärmestrom an der Station Weidenbrunnen in erster Näherung als fester Prozentsatz der Strahlungsbilanz angegeben werden; eine Messung der Profile von Bodentemperatur und -feuchte ist lediglich für eine genaue Bestimmung nötig. Der Neubau des Bodenmessfeldes am Messturm Weidenbrunnen inklusive direkter Messung des Bodenwärmestroms ist für das Jahr 2005 geplant.

Die Verteilung der Nadel- und Astmasse im Vertikalprofil der Bäume ist entscheidend für viele meteorologische Prozesse im Wald. Sie bestimmt somit u. a. den mittleren mechanischen Widerstand, dem die Luftströmung im Wald ausgesetzt ist, und damit auch die Form des mittleren Windprofils und die Höhe der Hauptumsatzfläche für alle Wechselwirkungen zwischen Vegetation und Strahlung einschließlich assimilatorischer und dissimilatorischer Vorgänge.



**Abbildung 4:** Mittelwert und Standardabweichung des kumulativen PAI (Plant Area Index) (links) und absolute Verteilung des PAI (rechts) im Vertikalprofil an der Messfläche Weidenbrunnen, aufgenommen Sep. 2004. Das mittlere Profil wurde aus vier Einzelprofilen ermittelt (optischer PAI-Sensors (Li2000, LiCor Inc., Lincoln) und die Messwerte mit einem Koniferenkorrekturfaktor von 1.6 (Gower & Norman, 1990) multipliziert.

Um eine aktuelle Charakterisierung des Messstandortes Weidenbrunnen zu erhalten, wurden dazu mehrere Vertikalprofile des PAI (Plant Area Index) im September 2004 aufgenommen. Das in Abbildung 4 dargestellte mittlere PAI-Profil ist ein Mittel aus vier Einzelprofilen, die um den meteorologischen Turm herum räumlich verteilt lagen.

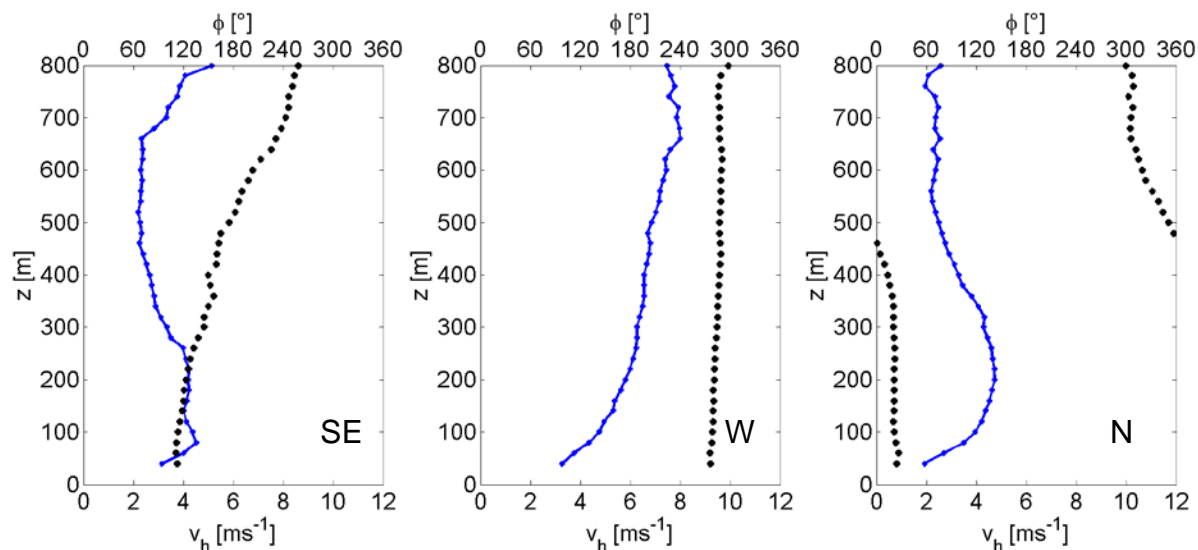
Mithilfe des optischen PAI-Sensors (LAI2000, Licor Inc., Lincoln) bestimmten Werte wurden mit einem aus der Literatur üblichen Korrekturfaktor von 1.6 multipliziert, um der systematischen Unterschätzung des PAI bei Koniferen Rechnung zu tragen (Norman and Gower, 1990). Das mittlere Profil zeigt, dass die Hauptnadel- und Astfläche in einer Höhe zwischen 10 m und 14 m über Grund verteilt ist. Der kumulative mittlere Wert von 5.2 ist etwas geringer als der von Klemm und Held (2004) ermittelte Wert von 6.4 für den Weidenbrunnen, was durch eine fortschreitende Auflichtung des Bestandes zu erklären ist.

Mittels eines SODAR-RASS Systems (BITÖK-Projekt A6) wurden im Pflanzgarten während des WALDATEM-2003 Sommerexperimentes auf den Messflächen am Waldstein Vertikalprofile des Windes zwischen 40 m ü. G. und ca. 800 m ü. G. gemessen. Auf Grund der Häufigkeitsverteilung der Windrichtungen an diesem Standort wurden drei Richtungssektoren ausgewiesen:

Nord-(N)-Sektor (Untergrenze 340°, Obergrenze 60°), Südost (SE)-Sektor (Untergrenze 80°, Obergrenze 180°) und West-(W)-Sektor (Untergrenze 200°, Obergrenze 320°).

Zur Klärung, ob sich bei wechselnder großräumiger Anströmbedingung unterschiedliche Windsysteme bzw. Luftmassenansammlungen für den Standort Waldstein bestimmen lassen, wurden für jeden Sektor mittlere Vertikalprofile der horizontalen Windgeschwindigkeit und der Windrichtung für den gesamten dreimonatigen Zeitraum des Experiments berechnet (Abbildung 5).

Es zeigte sich, dass bei südöstlichen Richtungen in Bodennähe (SE-Sektor) die Windrichtung mit zunehmender Höhe eine verstärkte Ausdehnung im Uhrzeigersinn aufwies (entgegen der Ekman-Drehung). Hinzu kam die Ausbildung eines schwachen sekundären Windmaximums in Höhen um 150 m ü. G. (Abbildung 5 links). Eine mögliche Ursache für die Linksdrehung der großräumigen Westanströmung in der Höhe nach Südost in Bodennähe ergibt sich durch eine orographisch bedingte Kanalisierung der Windströmung im Einflussbereich des Lehstenbachtals bei der Um- und Überströmung des Großen Waldsteins (877 m ü. NN). Bei westlichen Richtungen in Bodennähe (W-Sektor) zeigte sich im Mittel hingegen ein ungestörtes Windprofil ohne auffällige Ablenkung mit abnehmender Höhe (Abbildung 5 Mitte).



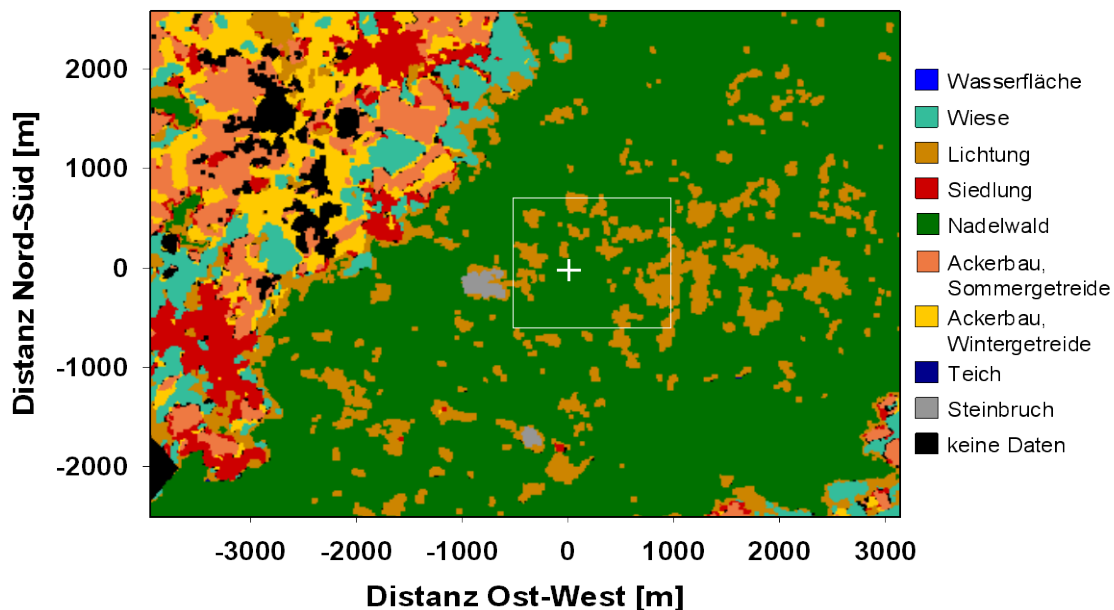
**Abbildung 5:** Mittlere Profile der horizontalen Windgeschwindigkeit (Linie) und der Windrichtung (Punkte) für die Sektoren SE (241 Profile), W (281 Profile) und N (268 Profile) am SODAR-Messstandort Waldstein Pflanzgarten (765 m ü. NN) während der Sommermonate Mai bis Juli 2003, WALDATEM-2003 (Mayer, 2005).



Bei nördlichen Richtungen in Bodennähe (N-Sektor) ließ sich im Mittel eine Ekman-Drehung des Windes mit abnehmender Höhe beobachten, sowie ein ausgeprägtes Windmaximum bei 230 m ü. G. (Abbildung 5 rechts). Diese Fälle ließen sich auf Wetterlagen zurückzuführen, bei denen bodennah Luft aus Nord herangeführt wurde, während in größere Höhe Westströmung vorherrschte. Zugleich zeigte sich unter diesen Bedingungen nicht selten ein Low-Level Jet, Ursache für das Windmaximum bei 230 m ü. G.

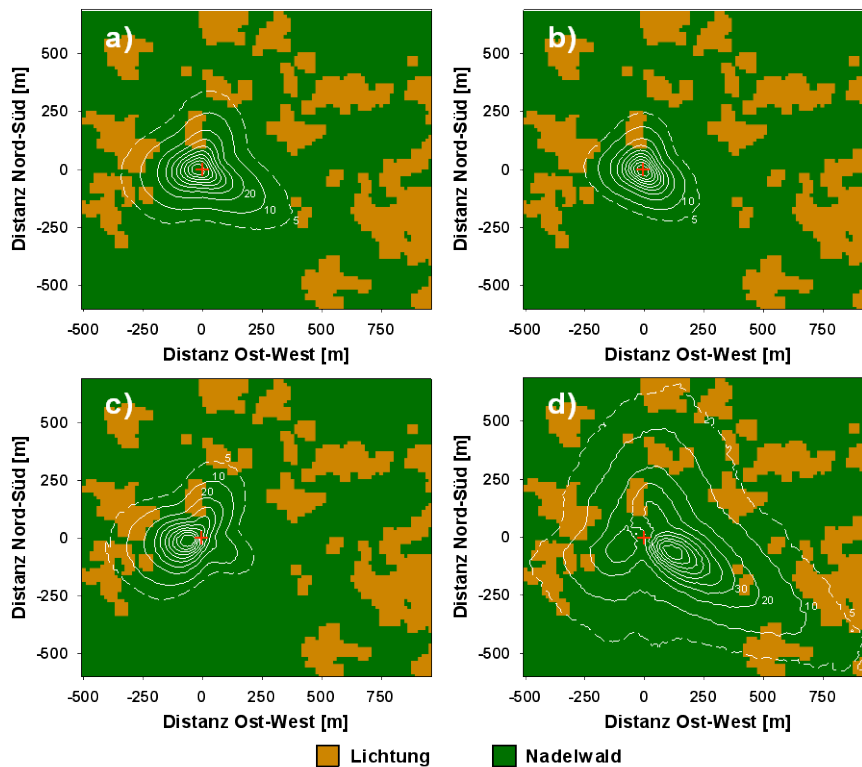
Aus diesen gewonnenen Beobachtungen lässt sich der Schluss ziehen, dass vor allem bei Ost- und bei Westwetterlagen am Standort Waldstein bodennahe Windmessungen keine unmittelbaren Rückschlüsse auf die großräumige Anströmsituation des Waldsteingebietes zulassen und auf den damit verbundenen Ferntransport von schadstoffbelasteten Luftmassen (z.B.  $\text{SO}_2$ ). Gleichfalls kann die bodennahe Luftmasse am Waldstein oftmals nicht durch die geostrophische Strömung charakterisiert werden. Dies muss somit in Verbindung mit den Luftschadstoffmessreihen am Waldstein bei der Beurteilung deren Herkunft zu einer sehr genauen Prüfung des Vergleiches der Luftschadstoffkonzentrationen mit bodennahen Windrichtungen führen.

Eine Qualitätsanalyse des Standorts Waldstein mit den footprintbasierten Verfahren von Göckede et al. (2005; 2004) zeigte ein weitgehend positives Gesamtergebnis für diesen Standort. Selbst unter stabilen Bedingungen besteht das Quellgebiet mit einer Gesamtgröße von etwa 1480 m x 1220 m lediglich aus Nadelwald und Lichtungsflächen (Abbildung 6 und Abbildung 7).



**Abbildung 6:** Landnutzungskarte für die Standortbewertung der Teststation Waldstein Weidenbrunnen. Die Turmposition ist mit einem weißen Kreuz gekennzeichnet. Der weiße Rahmen im Zentrum markiert den Bereich mit signifikantem Flussbeitrag zu den Turmmessungen.

Die Berechnung der akkumulierten Quellgebiete wurde für vier verschiedene atmosphärische Stabilitäten durchgeführt: labile ( $z/L < -0.0625$ ), neutrale ( $-0.0625 < z/L < 0.0625$ ) und stabile ( $z/L > 0.0625$ ) Fälle, zusätzlich die Zusammenfassung aller Schichtungen (Abbildung 7). Die Ergebnisse lassen die dreidimensionale Struktur des akkumulierten Einflusses anhand der Isolinien nachvollziehen. Die Werte sind normiert auf den Wert der Zelle mit dem maximalen Einfluss auf den Sensor, wobei die 90er Linie beispielsweise alle Matrixzellen einschließt, welche mindestens 90 % dieses Maximalwerts erreichen. Die neun durchgezogenen Linien überspannen den Wertebereich zwischen 10 % und 90 %, die gestrichelte Linie stellt die 5er-Isolinie dar.



**Abbildung 7:** Akkumulierte Quellgebiete für die Teststation Waldstein Weidenbrunnen, aufgeteilt nach a) alle Schichtungen, b) labile Schichtungen, c) neutrale Schichtungen, und d) stabile Schichtungen. Die Turmposition ist mit dem roten Kreuz gekennzeichnet, die weißen Isolinien geben die Position des akkumulierten Quellgebietes an.

In den berechneten Quellgebieten aller vier Fälle liegen nur die beiden Landnutzungsklassen Nadelwald und Lichtung vor. Diese aerodynamischen Heterogenitäten bzw. Rauigkeitsstufen an den Bestandsrändern können, je nach Anströmung und atmosphärischem Zustand verschieden, einen signifikanten Einfluss auf die Messungen nehmen. So lassen sich beispielsweise der Einfluss des Gipfels des Großen Waldsteins und der Pflanzgartenlichtung in den Flussmessungen erkennen (Foken and Leclerc, 2004).

Die ungefähre Größe des signifikanten Bereichs schwankt zwischen 500 m (E-W) x 480 m (N-S) bei labiler Schichtung (Abbildung 7b) und 1480 m x 1220 m bei stabiler Schichtung (Abbildung 7d), während über das Mittel aller Schichtungsfälle (Abbildung 7a) ein Bereich von 720 m x 620 m ausgewiesen werden kann. Das Maximum des akkumulierten Einflusses befindet sich im mittleren Falle sowie bei labiler Schichtung dicht an der Turmposition, mit einer leichten Tendenz Richtung Westen. Für neutrale Bedingungen ergibt sich ein Schwerpunkt des Geländeeinflusses im Südwesten und für stabile Fälle im Südosten.

Weiterhin wurde für Impulsfluss, fühlbaren und latenten Wärmefluss sowie den  $\text{CO}_2$ -Fluss eine Analyse der räumlichen Strukturen der Datenqualität von Austauschmessungen am Messturm durchgeführt. Generell spiegelte sich dabei eine sehr hohe Datenqualität wider. Die gemittelte Datenqualität für den Impulsfluss, latenten Wärmestrom sowie  $\text{CO}_2$ -Fluss zeigen durchgehend in allen Sektoren die höchsten Qualitätsstufen 1 und 2 (Foken et al., 2004). Das Ergebnis für den fühlbaren Wärmestrom dagegen weist deutliche räumliche Strukturen in der Datenqualität auf, welche allerdings zu einem großen Teil auf Problemen bei den zugrunde liegenden Parametrisierungsverfahren beruhen. Für das vertikale Windfeld zeigte sich ein signifikanter Effekt der lokalen Orographie auf den unrotierten Vertikalwind, was aber unter Verwendung der Planar-fit Rotationsmethode vollständig ausgeglichen werden kann.



### 3.2 Klimatische Auswertungen

Im Rahmen der umfangreichen ökologischen Forschungen des BITÖKs im Gebiet des Fichtelgebirges, des oberen Egertales und des Bayreuther Raums wurden vom Projekt A3 über den Gesamtzeitraum des BITÖKs intensive meteorologische Messungen inklusive der Erfassung von Luftschadstoffen durchgeführt. Zusätzlich wurden die Routinedaten des Deutschen und des Tschechischen Wetterdienstes für die klimatische Auswertung herangezogen. Im Einklang mit dem Hauptziel der BITÖK-Forschung ist es ein Teilziel dieses Projektes eine Einordnung in die mitteleuropäische und globale Klimaentwicklung vorzunehmen und Bewertungen hinsichtlich des Einflusses der beobachteten Klimatrends auf die Ökosysteme und den Wirtschaftsraum der oberfränkischen Region zu erarbeiten. Diese mikro- und mesoskalige Charakterisierung des Klimas und der lufthygienischen Situation beinhaltet neben der detaillierten Kenntnis der atmosphärischen Prozesse die wichtigsten Steuergrößen sowohl für die Ökosysteme selbst als auch für die kontrollierten Feldexperimente.

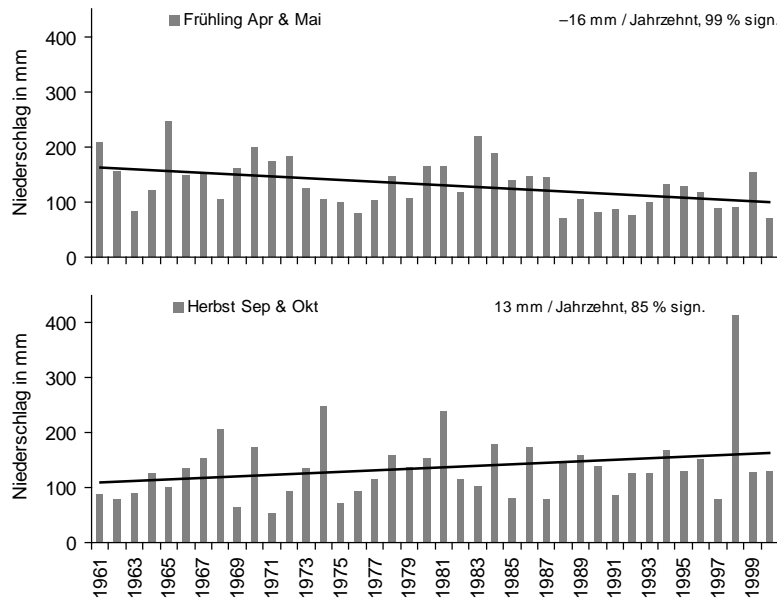
Als Beispiel für solch eine regionalklimatisch bedingte Einflussnahme ist folgende Situation bezeichnend. So ermöglicht das ins Fichtelgebirgsmassiv gegrabene obere Egertal aufgrund dieser geographischen Besonderheit vordringlich im Winterhalbjahr das Einströmen kalter kontinentaler Luftmassen aus Nordböhmen in die Hochlagen des Fichtelgebirges und über das Maintal, Bayreuth und die Fränkische Schweiz in den nordbayerischen Raum. Diese winterlichen Ostlagen brachten in der Vergangenheit stark mit Schadgasen wie  $\text{SO}_2$  belastete Luftmassen mit sich (Säureeintrag). Aufgrund der greifenden Umweltschutzmassnahmen hat sich in den letzten 10 Jahren eine erhebliche Reduzierung des Schadstoffeintrages bei Ostlagen herausgestellt mit positiven Folgen für die betroffene Vegetation (siehe vorherige BITÖK-Jahresberichte; Foken 2003c; Klemm and Lange 1999).

Die Qualitätsprüfung und Korrektur der selbst erhobenen Datensätze und die Zeitreihenkonstruktionen wurden zunächst für einen allgemeinen klimatischen Überblick auf die wichtigsten für das östliche Oberfranken repräsentativen Klimaelemente beschränkt.

#### *Niederschlag*

Der Niederschlag in Oberfranken und der benachbarten Gebirge weist in der Regel eine typische Zunahme mit der Geländehöhe auf. Typisch sind auch die starken kleinräumigen Unterschiede der Niederschlagsmenge für eine Mittelgebirgsregion. Einfluss nimmt die Orographie Oberfrankens durch unterschiedliche Exponiertheit gegenüber anströmenden Luftmassen (z.B. Stauniederschlag bei Westwetterlagen oder Lee-Erscheinungen) aber auch die ungleichmäßige Verteilung besondere Einzelregenereignissen (z.B. Gewitterniederschlag).

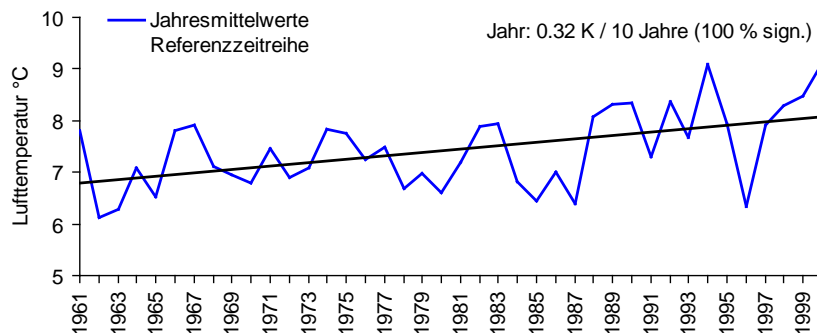
Um eine Zeitreihenanalyse für das östliche Oberfranken durchzuführen, wurden unter Berücksichtigung der zuvor beschriebenen regionalen Situation aus fünf repräsentativen Niederschlagstationen (Warmensteinach, Thierstein, Bischofsgrün, Wunsiedel, Marktleuten) eine Referenzzeitreihe berechnet und ausgewertet (Foken 2003c). Die beobachteten leicht Zunahmen des Jahresniederschlags bzw. des Winterniederschlags im östlichen Oberfranken ist jedoch im Gegensatz zum sächsischen Raum nicht signifikant (Mann-Kandell-Trendtest). Eine Analyse des saisonalen und monatlichen Niederschlags hingegen weist eine erhebliche Veränderung des Niederschlagsregimes im Jahresverlauf nach. Auffällig ist die hochsignifikante Niederschlagsabnahme im Frühling (April und Mai:  $-16$  mm pro Jahrzehnt), die hochsignifikante Zunahme im Juli und die deutliche Reduzierung im August und der starke Trend zu einer höheren Niederschlagssumme im Herbst (Abbildung 8). Für die bemerkenswerte Zunahme des Niederschlags im Juli sind offensichtlich die im vergangenen Jahrzehnt verstärkt aufgetretenen so genannten 'Sommermonsun'-Wetterlagen (Siebenschläfer) verantwortlich. Die regenreicheren Herbstmonate lassen auf eine Abnahme in der Häufigkeit der Hochdruckwetterlagen (Altweibersommer) schließen.



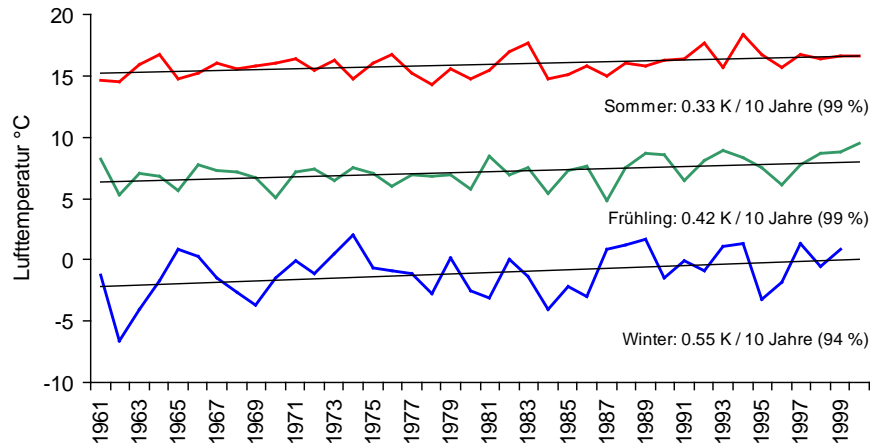
**Abbildung 8:** Lineare Trends und saisonale Summen des Niederschlags für das Frühjahr (April und Mai) und für den Herbst (Monate September und Oktober) der Referenzzeitreihe (Warmensteinach, Thierstein, Bischofsgrün, Wunsiedel, Marktleuten) für das östliche Oberfranken (Lüers & Foken, 2004).

### *Lufttemperatur*

Als Basis für die Untersuchung diente als Referenz eine mittlere Lufttemperaturreihe der Stationen Hof-Hohensaas, Bayreuth und Weiden der Jahre 1961 bis 2000. Es ergibt sich danach eine signifikante Temperaturzunahme der Jahresmitteltemperatur von 0.32 K pro Jahrzehnt (Abbildung 9). Es ist augenfällig, dass die positiven Temperaturabweichungen insbesondere im letzten Jahrzehnt mit Ausnahme von 1996 zugenommen haben. Die saisonale Analyse in Abbildung 10 belegt die je nach Jahreszeit unterschiedliche Ausprägung des Erwärmungstrends. Der Trendbetrag in den Wintermonaten ist mit 0.55 K pro Jahrzehnt am größten, hervorgerufen v. a. durch die Erhöhung der winterlichen Minimumtemperatur und verbunden mit einer offensichtlichen Abnahme der winterlichen Ostwetterlagen. Die positive Entwicklung im Frühjahr ist die statistisch signifikanteste.

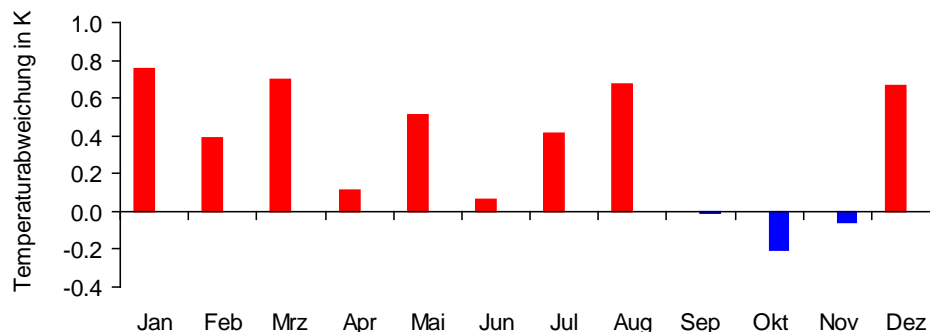


**Abbildung 9:** Linearer Trend und Jahresmittelwerte in °C der Lufttemperatur der Referenzzeitreihe (Hof, Bayreuth und Weiden) für den Zeitraum 1961 bis 2000 repräsentativ für das östliche Oberfranken (Lüers & Foken, 2004).



**Abbildung 10:** Lineare Trends und saisonale Lufttemperaturmittel in °C der Referenzzeitreihe Hof, Bayreuth und Weiden für den Zeitraum 1961 bis 2000 repräsentativ für das östliche Oberfranken. Sommer: Jun, Jul, Aug; Frühling: Mrz, Apr, Mai; Winter: Dez, Jan, Feb. Für den Bezug der Winter gilt: 1961 entspricht Dez 1961 und Jan und Feb 1962 (Lüers & Foken, 2004).

Der Herbst zeigt einen gegenläufigen, jedoch nicht signifikanten negativen Trend. Die Veränderung der Temperatur in Jahresverlauf anhand des Vergleiches der Normalreihen 1961 bis 1990 und 1971 bis 2000 verdeutlicht Abbildung 11. Vergleichbare Veränderungen in Jahresgang der Temperatur und damit eine Verschiebung der Starttermine der thermischen Jahreszeiten wurden von Lüers (2003) für den Westen Deutschlands (Moselraum) gefunden.



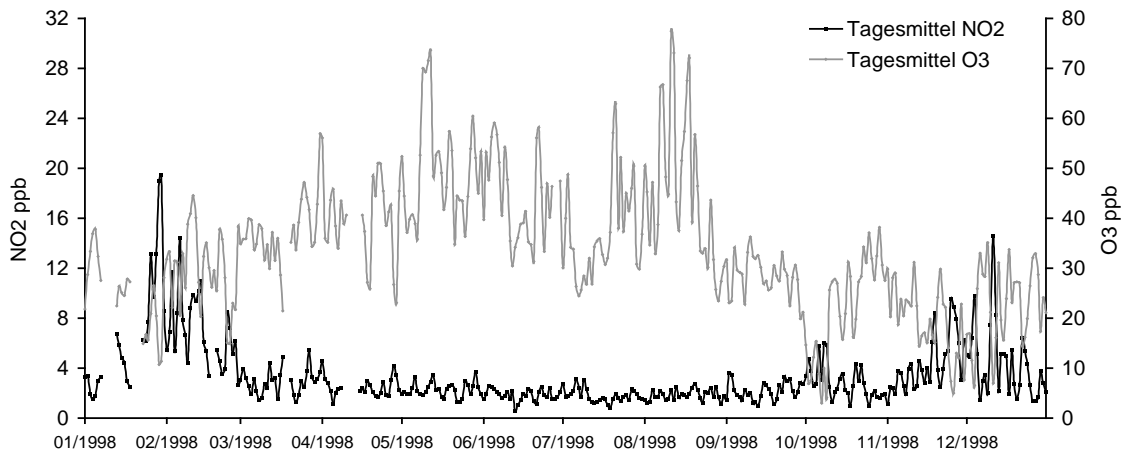
**Abbildung 11:** Temperaturabweichung in K. Vergleich der langjährigen Monatsmittel der Referenzzeitreihe der 30jährigen Klimaperiode 1961 bis 1990 und des aktuellen Klimazeitraumes 1971 bis 2000 für das östliche Oberfranken (Lüers & Foken, 2004).

### 3.3 Luftchemische Messungen Waldstein

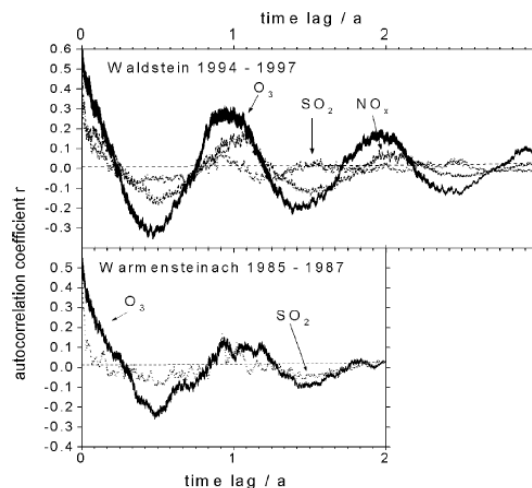
Messungen der Spurengase Ozon ( $O_3$ ), Stickstoffoxide ( $NO$ ,  $NO_2$ ) und Schwefeldioxid ( $SO_2$ ) werden seit Mitte 1994 kontinuierlich am Messstandort Waldstein Pflanzgarten (765 m ü. NN, Waldlichtung) durchgeführt. Eine detaillierte Beschreibung und Auswertung der lufthygienischen Situation im oberen Egertal einschließlich der Messdaten vom Standort Waldstein liefert Foken (2003c). Klemm und Lange (1999) und Klemm (2004) beschreiben ausführlich die Trendentwicklung der Luftschadstoffe im Fichtelgebirge.

Sowohl die Ozon-Konzentration als auch die Konzentration der Stickstoffoxide zeigt einen deutlichen gegenläufigen Jahresgang. Am Beispiel des Jahres 1998 (Abbildung 12) lassen sich zu-

sätzlich markante, an Witterungsregelfälle gebundene Perioden hoher Ozon-Konzentration (Mai - Anfang Juni > Frühsommer; Ende Juli - Mitte August > Hochsommer) bzw. geringer Konzentration (Anfang Juli > Siebenschläfer; Ende September - Anfang Oktober > Herbstwitterungsumschlag) erkennen.

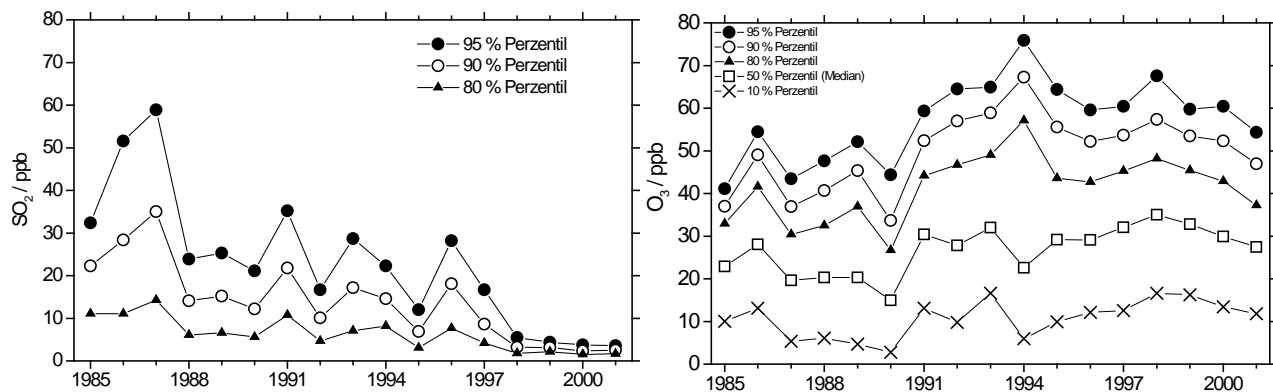


**Abbildung 12:** Jahresgang der Tagesmittel der Ozon-Konzentration und der Stickstoffdioxid-Konzentration des Jahres 1998. Messstation Waldstein-Pflanzgarten (765 m ü. NN, Waldlichtung).



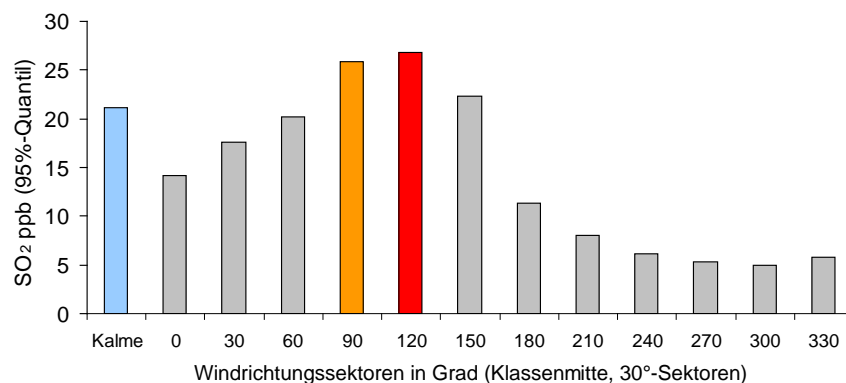
**Abbildung 13:** Autokorrelationsfunktion (ACF) der Spurengase gemessen an den beiden Waldstandorten Waldstein Pflanzgarten (ab 1994) und am Vorläuferstandort Warmensteinach (bis 1993). Datenwerte oberhalb der gestrichelten Linie zeigen eine positive Autokorrelation gemäß der Zeitverschiebung.

Die Saisonalität der Ozon- und Stickstoffdioxid-Konzentration quantifiziert die von Klemm und Lange (1999) durchgeführte Autokorrelationsanalyse (Abbildung 13). Der Jahresgang der Funktionen erklärt sich durch vermehrte Ozonbildung aufgrund einer erhöhten  $\text{NO}_2$ -Photolyserate während strahlungsreicher Wetterlagen im Frühling und Sommer. Die Amplitude der Autokorrelationsfunktion beider Spurengase schwächt sich erwartungsgemäß für Zeitverschiebungen größer ein Jahr rasch ab, ein Zeichen, dass die gefundene halbjährliche Periodizität nicht extrem regulär verläuft bzw. durch die Variabilität der für Ozonbildung förderlicher oder hinderlicher Witterungslagen gedämpft wird. Auch für  $\text{SO}_2$  lässt sich ein schwacher Jahresgang von zumeist höherer Konzentrationen im Winterhalbjahr und geringerer Werte im Sommer nachweisen.



**Abbildung 14:** Zeitreihen der SO<sub>2</sub>-Konzentration (links) und der O<sub>3</sub>-Konzentration (rechts). Jahreswerte verschiedener Quantils. Messstation Waldstein-Pflanzgarten (765 m ü. NN, Waldlichtung).

Die Belastung des Fichtelgebirges durch SO<sub>2</sub> ist in den vergangenen 20 Jahren infolge der Rauchgasentschwefelung aller deutschen und tschechischen Kohlekraftwerke deutlich zurückgegangen (Abbildung 14 links). Dies gilt für alle Windrichtungen, am stärksten jedoch für die Luftmassen aus Norden. Episoden mit deutlich erhöhter SO<sub>2</sub>-Konzentration treten jedoch weiterhin über den ganzen Jahresverlauf auf. Diese markanten SO<sub>2</sub>-Episoden sind vorwiegend an östliche bis südöstliche Winde gebunden (Abbildung 15).



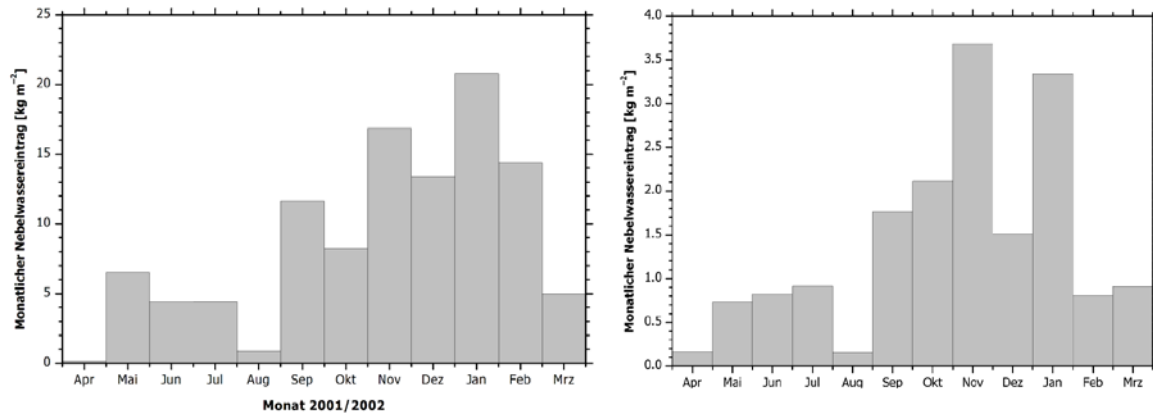
**Abbildung 15:** Verteilung der SO<sub>2</sub>-Konzentration (95%-Quantil) des Jahres 1997 auf zwölf Windrichtungssektoren (Klassenmitte in Grad). Null entspricht Nord, 90 Ost, 180 Süd, 270 West.

Die Belastung durch Stickstoffoxide (NO<sub>x</sub> = NO + NO<sub>2</sub>) ist entsprechend der relativ ländlichen Lage des Fichtelgebirges moderat. Typische Tagesmittel liegen in der Größenordnung 5 ppb. Höhere Werte von 20 ppb bis zu 50 ppb treten fast ausschließlich in den Jahreszeiten Herbst, Winter und Frühjahr auf (Abbildung 12), und zwar dann wenn sich eine stabile atmosphärische Grenzschicht bis in die Höhenlage der Messstation rund um das Fichtelgebirge etabliert hat, in der sich die Emissionen vorwiegend aus dem Autoverkehr anreichern können. Es besteht keine systematische Abhängigkeit der Stickstoffoxid-Belastung von der Windrichtung und es kann auch kein signifikanter zeitlicher Trend festgestellt werden.

Die zeitliche Entwicklung der Ozon-Konzentration der letzten 20 Jahre im Fichtelgebirge (Abbildung 14 rechts) weist bis in die Mitte der neunziger Jahre des 20. Jahrhunderts eine signifikante Zunahme auf. Bemerkenswert ist hier die Zunahme der Hintergrundkonzentration (10%-Quantile, 50%-Quantile). Die folgenden Jahre bis einschließlich 2004 lassen ein Stagnieren der Ozon-Konzentration auf hohem Niveau erkennen (Überschreitung des AOT40 selbst in den Wintermonaten).

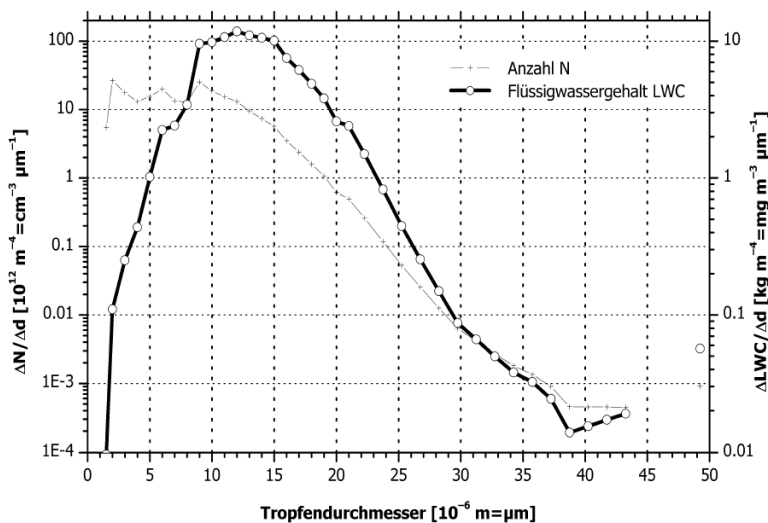
### 3.4 Nebeldeposition

Die Messung der Nebeldeposition im Untersuchungszeitraum ergab einen Eintrag von  $108 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  Wasser für die turbulente Deposition und  $17 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  für den Eintrag über Sedimentation. Der turbulente Eintrag dominierte also mit ca. 86 % die Nebeldeposition. Die Summe aus beiden Eintragsarten entsprach einem Nebelniederschlag von 125 mm p. a. Eine klare Saisonalität der Nebelwasserflüsse lies sich erkennen. Die höchsten Nebelniederschläge waren im Spätherbst und im Winter zu verzeichnen, monatlich bis zu 24 mm (Januar) wurden gemessen (Abbildung 16). Die geringste Nebeldeposition wurde im August mit ca. 1 mm gemessen.



**Abbildung 16:** Monatlicher turbulenter (links)Nebelwassereintrag (Messwerte vom 17.4.2001 bis zum 31.3.2002) und sedimentativer (rechts) Nebelwassereintrag (Messwerte vom 2.4.2001 bis 2.4.2002) am Standort Waldstein Weidenbrunnen für 2001/2002. Alle Monatsflüsse sind Einträge in das Ökosystem (Wrzesinsky, 2004).

Die ermittelten Tropfenspektren zeigten bei der Anzahlverteilung Maxima bei  $2 \mu\text{m}$ ,  $6 \mu\text{m}$  und  $9 \mu\text{m}$  sowie ein Maximum von  $12 \mu\text{m}$  in der Massenverteilung (Abbildung 17). Für die Massen-



gemessenen Flüssigwassergehalte lagen bei einem Median von  $156 \text{ mg m}^{-3}$  und erreichten Maxima von  $2639 \text{ mg m}^{-3}$  (5-min-Mittel). Den größten Anteil am Fluss hatte die Größenklasse von  $14.5 \mu\text{m}$  bis  $15.5 \mu\text{m}$  Tropfendurchmesser. Tropfen kleiner  $7 \mu\text{m}$  wurden effektiv emittiert, die größeren deponiert. Die im Untersuchungszeitraum gefallene Menge an Regen und Schnee betrug 1414 mm. Der Anteil des Nebels am atmosphärischen Eintrag von Wasser betrug demzufolge etwa 8 %.

**Abbildung 17:** Mediane Tropfengrößenverteilung des Nebelwassers am Waldstein 2001/2002. Datengrundlage: ausgewertete 5-min-Werte des FM-100. Dargestellt: Anzahl- und Massengrößenverteilung, LWC, (Wrzesinsky, 2004).

Für insgesamt 253 Nebelereignisse wurden im Untersuchungszeitraum Proben gewonnen. Außerdem wurden zum Vergleich auf wöchentlicher Basis Wet-Only-Proben gewonnen. Die Konzentrationen in Nebel- und Regenwasser waren hoch variabel. Die Mediane lagen im Nebelwasser bei pH 4.14, 621  $\mu\text{eq l}^{-1}$  für  $\text{NH}_4^+$ , 487  $\mu\text{eq l}^{-1}$  für  $\text{NO}_3^-$  und 321  $\mu\text{eq l}^{-1}$  für  $\text{SO}_4^{2-}$ .

Diese drei Hauptionen machten somit rund 87 % der Gesamtkonzentration aus. Die Konzentrationen im Nebelwasser waren deutlich gegenüber dem Wet-Only-Niederschlag erhöht. Die Anreicherungsfaktoren betrugen 18.1 ( $\text{NH}_4^+$ ), 13.1 ( $\text{NO}_3^-$ ) bzw. 11.5 ( $\text{SO}_4^{2-}$ ).

Der Nebel gebundene Eintrag der wichtigsten Ionen wurde aus der Konzentration und dem Nebelwasserfluss errechnet. Die eingetragenen Mengen waren 9.8  $\text{kg ha}^{-1}$  für  $\text{NH}_4^+$  (7.9  $\text{kg ha}^{-1}$  für Wet-Only), 27.9  $\text{kg ha}^{-1}$  für  $\text{NO}_3^-$  (25.1) bzw. 14.0  $\text{kg ha}^{-1}$  für  $\text{SO}_4^{2-}$  (15.0). Die durch feuchte oder okkulte Deposition eingetragene Menge lag für diese Ionen also im gleichen Größenbereich wie die Menge aus Regen und Schnee.

Der Stickstoffeintrag betrug insgesamt 13.9  $\text{kg N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$  (11.8  $\text{kg N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$  für Wet-Only). Der im Untersuchungszeitraum durch den Bestandesniederschlag gemessene Eintrag von Stickstoff lag bei 23.3  $\text{kg N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ . Die Differenz aus Bestandesniederschlag einerseits und Wet-Only und Nebel andererseits lag mit  $-0.9 \text{ kg N ha}^{-1} \text{a}^{-1}$  nahe Null. Zusätzliche Einträge konnten durch die trockene Deposition (z. B. durch partikuläres Nitrat und Salpetersäure) erwartet werden. Der Umsatz von Stoffen im Kronenraum spielte dabei eine wichtige Rolle in der Schließung der Ökosystembilanz für die verschiedenen Stoffe (Wrzesinsky, 2004; Scheer, 2002).

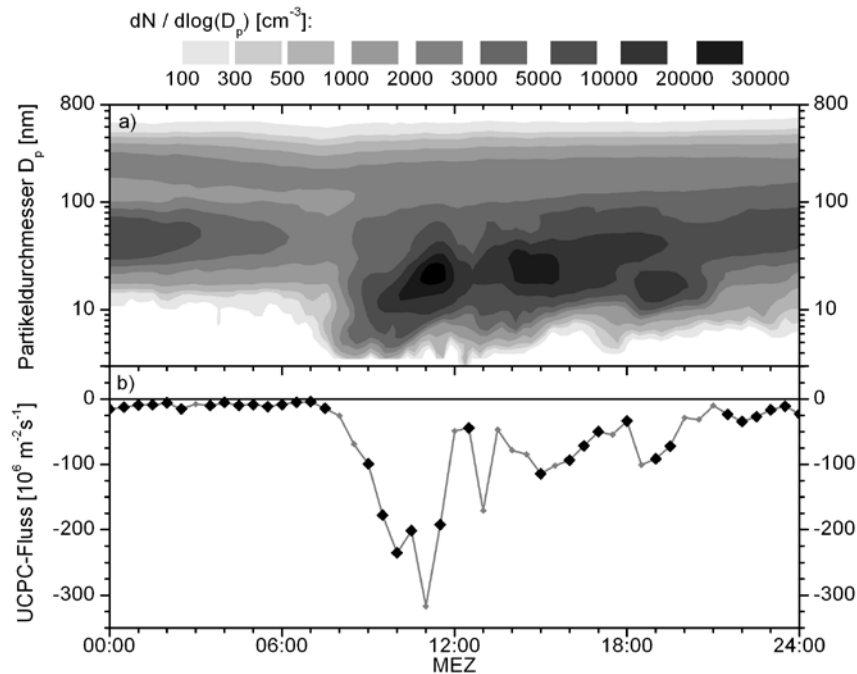
### 3.5 Partikelmessungen am Waldstein

Um Partikelbildungsereignisse zu identifizieren wurde in Kooperation mit dem Institut für Troposphärenforschung (IfT Leipzig) die Partikelgrößenverteilung unter Einsatz eines Differential Mobility Particle Sizer (DMPS; Birmili et al., 1999) bestehend aus zwei unabhängigen Partikelzähler (UCPC und CPC) kontinuierlich gemessen.

Typische Partikelanzahlkonzentrationen (3 nm bis 3  $\mu\text{m}$  Durchmesser) bewegten sich am Standort Weidenbrunnen zwischen 5000 und 7000 Partikel  $\text{cm}^{-3}$  mit Maximalwerten bis zu 50000 Partikel  $\text{cm}^{-3}$ . Die Partikelkonzentration im Bestand lag typischerweise bei etwa drei Viertel der Konzentration über dem Bestand. Häufig konnte ein ausgeprägter Tagesgang mit niedrigen Konzentrationen in der Nacht und erhöhten Partikelzahlen am Tage beobachtet werden (Held, 2004).

Der turbulente Partikelanzahlfluss zeigte ebenfalls einen ausgeprägten Tagesgang mit vernachlässigbaren Flüssen in der Nacht und überwiegend Depositionsflüssen am Tage (Abbildung 18b). Etwa 81 % der UCPC-Anzahlflüsse (3 nm bis 3  $\mu\text{m}$  Durchmesser) lagen in einem Bereich von  $-35 \cdot 10^6$  bis  $+5 \cdot 10^6$  Partikel pro  $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , etwa 85 % der CPC-Anzahlflüsse (11 nm bis 3  $\mu\text{m}$  Durchmesser) zwischen  $-25 \cdot 10^6$  und  $+5 \cdot 10^6$  Partikel pro  $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . Die maximalen Beträge der 90 %-Perzentilwerte einzelner Messtage betrugen  $-110 \cdot 10^6$  (CPC) bzw.  $-275 \cdot 10^6$  Partikel pro  $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (UCPC). Die entsprechenden Transfargeschwindigkeiten bewegten sich zwischen  $-12$  und  $+13 \text{ mm s}^{-1}$  (CPC) bzw.  $-37$  und  $+23 \text{ mm s}^{-1}$  (UCPC).

Durch den Einsatz der zwei unterschiedlichen Partikelzähler konnte die Transfargeschwindigkeit der ultrafeinen Partikelfraktion (3 nm bis 11 nm Durchmesser) abgeschätzt werden. Diese war deutlich erhöht, mit Werten zwischen  $-39$  und  $+70 \text{ mm s}^{-1}$ . Ein Vergleich dieser Werte mit größen aufgelöst modellierten Partikeldepositionsgeschwindigkeiten ergab eine plausible Übereinstimmung. Die Abschätzung von Partikelmasseflüssen ist mit Hilfe der genannten Messungen und Modellansätze nur bedingt möglich. Durch Kombination des sog. *Disjunct-Eddy-Sampling* mit *Flugzeit-Massenspektrometrie* zur Einzelpartikelanalyse wurden Grundlagen eines innovativen Ansatzes zur direkten Bestimmung turbulenter Flüsse individueller Partikelkomponenten geschaffen.



**Abbildung 18:** Partikelgrößenverteilung (a) und turbulenter Partikelanzahlfluss (b) am 2. August 2001.

Starke Depositionsflüsse konnten häufig im Zusammenhang mit Partikelneubildung beobachtet werden (Held, 2004). Nukleations-Ereignisse wurden anhand einer charakteristischen „bananen-förmigen“ Entwicklung der Partikelgrößenverteilung sowie erhöhten Konzentrationen der ultrafeinen Partikelfraktion zwischen 3 nm und 20 nm Durchmesser identifiziert (Abbildung 18a). Während dieser Ereignisse herrschten überwiegend südöstliche Windrichtungen vor. Neben leicht erhöhten  $\text{SO}_2$ -Mischungsverhältnissen begünstigten darüber hinaus meteorologische Faktoren wie intensive kurzweilige Strahlung, erhöhte Lufttemperaturen und geringe Wasserdampfkonzentrationen die Ausbildung von Nukleations-Ereignissen. Ein eindeutiger Zusammenhang der Nukleationsneigung und der Partikeloberfläche der vorhandenen Aerosolpopulation, die als Kondensationssenke für schwerflüchtige Gase dient, war nicht festzustellen.

Die Wachstumsdynamik der neu gebildeten Partikel wurde durch eine detaillierte Analyse und Parametrisierung der gemessenen Partikelgrößenverteilungen quantifiziert (Held et al., 2005). Dabei zeigte sich ein bemerkenswert konstantes Wachstumsverhalten mit Durchmesserwachstumsraten von 2.2 bis 5.7 nm h<sup>-1</sup>. Eine theoretische Abschätzung des Kondensationsbeitrags verschiedener Spurengase ergab, dass die  $\text{H}_2\text{SO}_4$ -Kondensation nur einen geringen Teil des Wachstums (meist unter 10 %) erklären kann. Oxidationsprodukte biogen emittierter organischer Verbindungen tragen dagegen unter Annahme plausibler Massenerträge einen erheblichen Teil zum Kondensationswachstum bei. In vier von acht untersuchten Ereignissen war das Wachstum vollständig durch Kondensation von  $\text{H}_2\text{SO}_4$  und kondensierbaren organischen Verbindungen zu erklären.

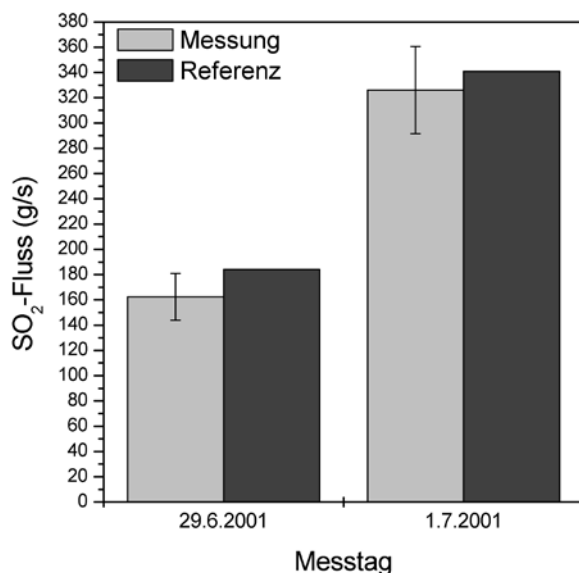
### 3.6 LIDAR-Messungen Arzberg

Das mit Lidar (Light Detection and Ranging) und Sodar (Sound Detection and Ranging) ausgestattete Fernmesssystem des Lehrstuhls für Technische Thermodynamik und Transportprozesse (LTTT) wurde zur Bestimmung der  $\text{SO}_2$ -Emission des Kraftwerks Arzberg eingesetzt. Die Messungen fanden aus einer Entfernung von rund 1000 m zur Rauchfahne bei Voll- und Teillastbetrieb des Kraftwerks statt. Die Quantifizierung der  $\text{SO}_2$ -Flüsse und ihrer Unsicherheiten erfolgte aus einer Serie von Lidar-Messungen der Konzentration und Ausdehnung der Rauchfahne



sowie Sodar-Messungen der Windrichtung und -geschwindigkeit.

Es ergab sich eine gute Übereinstimmung zwischen den aus Lidar/Sodar-Messungen berechneten mittleren Flüssen und den erst anschließend



bekannt gegebenen Referenzwerten des Betreibers (Abbildung 19). Hierbei setzte sich der Fehler der berechneten  $\text{SO}_2$ -Flüsse aus den Unsicherheiten der Rauchfahnenfläche, der auf dieser senkrecht stehenden Windgeschwindigkeit und der Konzentration zusammen.

Insgesamt unterstreicht dieses Ergebnis die Nützlichkeit der Fernerkundung bei der Bestimmung von Emissionen und der Ausbreitung von Luftverunreinigungen. Weitere Ergebnisse wurden unter Schröter et al. (2003) veröffentlicht.

**Abbildung 19:** Vergleich des Referenzwerts des Kraftwerksbetreibers mit dem aus Lidar/Sodar-Messungen berechneten  $\text{SO}_2$ -Fluss (Schröter et al., 2003).

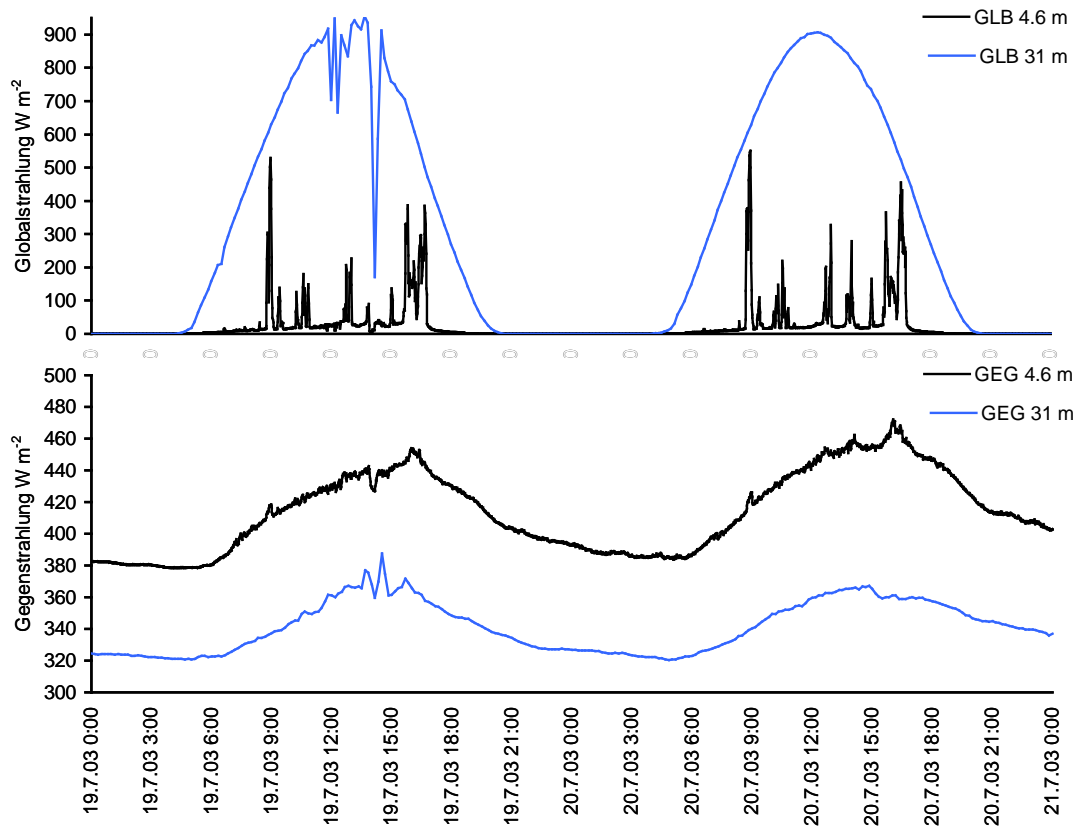
### 3.7 Sommerexperiment WALDATEM-2003 am Messturm Waldstein Weidenbrunnen

Im Rahmen der BITÖK-Forschungen (A6 und A7) diente dieses komplexe Experiment in erster Line der intensiven Untersuchung von kohärenten Strukturen und Kohlenstoffflüssen in und über einem hohen Fichtenwald, dessen Name sich von den verwendeten Analysesystemen herleitet (WALD = WAVElet Detection, ATEM = Atmospheric Turbulence Exchange Measurements).

Der während des Experimentes für das Projekt A3 relevante Teil war die Messung räumlich hoch aufgelöster Vertikalprofile des Windes, der Lufttemperatur und der  $\text{CO}_2$ -Konzentration im 19 m hohen Nadelwaldbestand des Standortes Waldstein Weidenbrunnen. Der Messaufbau (s. BITÖK-Projekt A6) hatte u. a. zum Ziel, typische und außergewöhnliche Situationen und Effekte wie gekoppelte oder entkoppelte Austauschbedingungen zwischen der Atmosphäre im Pflanzenbestand und der freien Luftschicht darüber, wie die Einflussnahme von Gewitterereignissen oder auch nächtliche Kaltluftabflüsse in Waldbodennähe zu erfassen und zu beschreiben. Die Eingangsdaten wurden durch mittelschnelle Messsysteme von sieben Schalensternanemometer, sechs Temperaturregeber, acht  $\text{CO}_2$ -Profilemessungen und zwei Systemen zur Messung der kurz- und langwelligen Strahlungskomponenten in entsprechend unterschiedlichen Messhöhen im und über dem Fichtenbestand erhalten.

Die Ergebnisse der Auswertung der gemittelten Profile (10 min Mittel od. Summen) und der begleitenden meteorologischen Messungen während WALDATEM-2003 zeigen sowohl typische als auch außergewöhnliche mikrometeorologische Situationen und Effekte in einem Fichtenforst während einer – aufgrund der extrem heißen und trockenen Witterung 2003 – nicht typischen Sommerperiode.

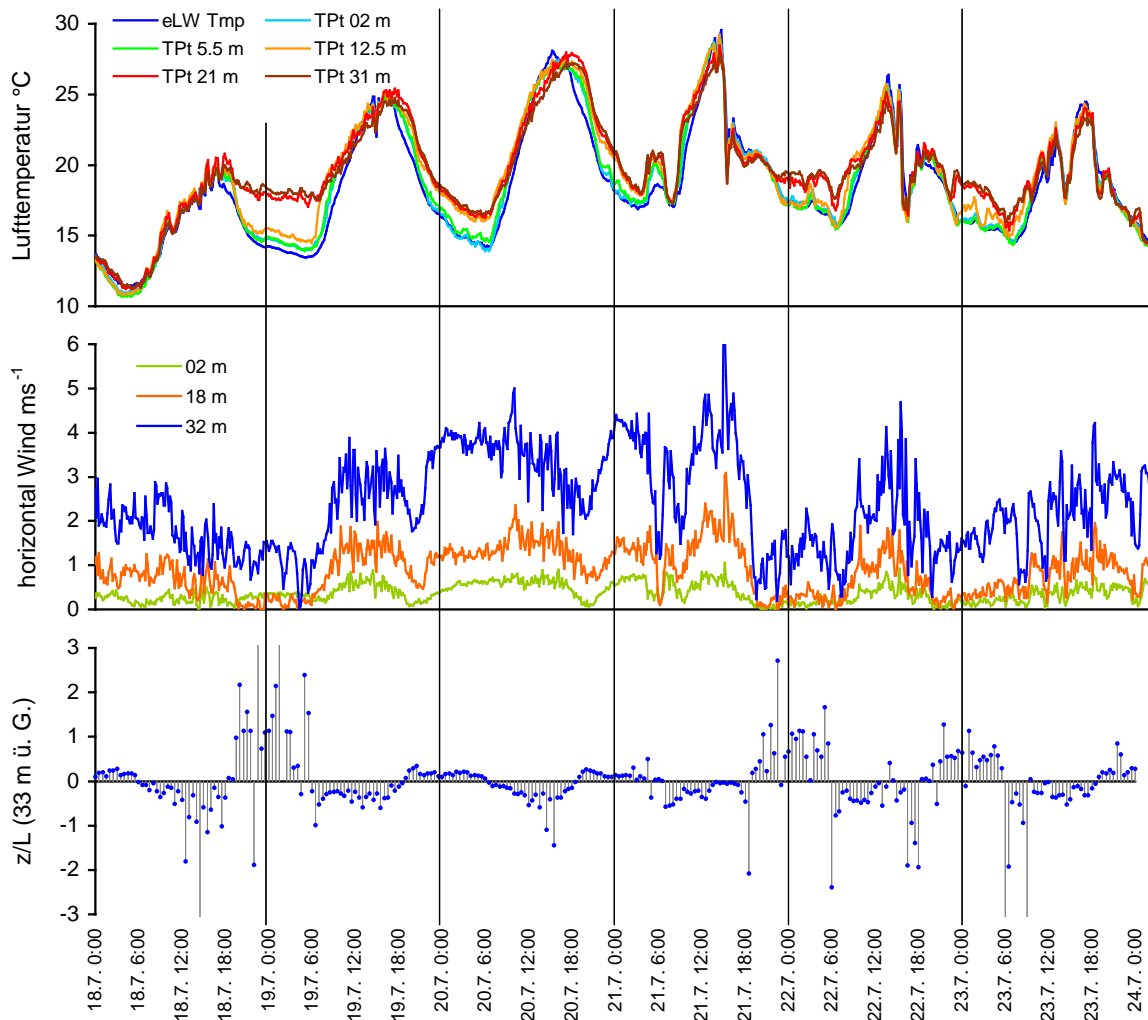
Die Strahlung ist ein zentraler Parameter zur Steuerung physiologischer Vorgänge im Ökosystem. Die kurzwelligen und langwelligen Komponenten der Strahlungsbilanz wurden im und über dem Fichtenforst mittels Pyranometern und Pyrgeometern bestimmt, die in den Höhen 4.6 m (Stammraum) und 31.0 m (12 m über Kronendach) am Hauptturm installiert waren. Durch den Vergleich der beiden unabhängigen Strahlungsmessungen konnten die stark unterschiedlichen Bestrahlungsverhältnisse im Bestand und darüber quantifiziert werden.



**Abbildung 20:** Kurzwellige (oben) und langwellige (unten) Strahlungsbedingungen, Messstandort Waldstein Weidenbrunnen (775 m ü. NN), WALDATEM-2003 Experiment, Zeitausschnitt 19. Juli und 20. Juli 2003 (Lüers et al., 2004). GLB = Globalstrahlung, GEG = Gegenstrahlung jeweils in  $\text{W m}^{-2}$  in 4.6 m ü. G. (Stammraum) und in 31 m ü. G. (12 m über Kronendach).

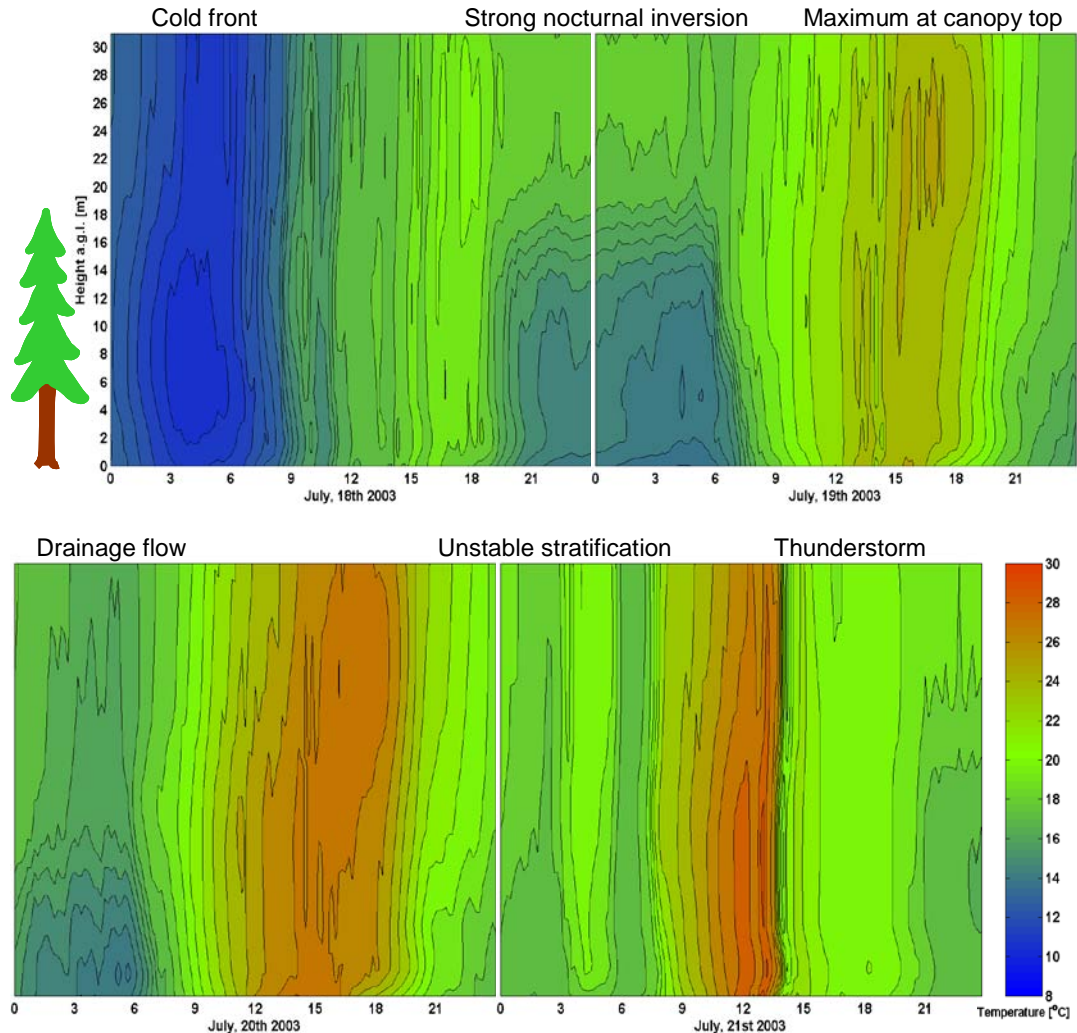
Die Abbildung 20 zeigt exemplarisch anhand zweier herausgegriffener Tage (19. Juli und 20. Juli 2003) im kurzwelligen Bereich eine mittlere Reduktion der Globalstrahlung im Stammraum am Standort Weidenbrunnen um rund 90 % (Lüers et al., 2004). Weiterhin typisch für Beleuchtungsverhältnisse in einem Pflanzenbestand ist zum einen eine deutliche Verkürzung der Tageslichtzeit mit Globalstrahlungsbeträgen größer  $10 \text{ W m}^{-2}$ , die sich am Standort Weidenbrunnen im Juni/Juli morgens durch eine rund 3stündige Verzögerung (4:30 MEZ, 7:30 MEZ) und abends durch eine Vorverlagerung der Dämmerung von fast 2.5 Stunden (17:30 MEZ, 20:00 MEZ) bemerkbar macht.

Zum anderen spielt der schnelle Wechsel zwischen hoher und niedriger Strahlungsintensität durch Fluktuation der so genannten „Sunflecks“ (Dauer und Intensität abhängig durch den „Gap Light Index GLI“, Whatley and Whatley, 1980) im Pflanzenbestand eine bedeutende Rolle beim Dargebot der PAR (Photosynthetisch Aktive Strahlung). Bemerkenswert ist das über den Monaten Mai, Juni und Juli recht konstante Offset von knapp  $60 \text{ W m}^{-2}$  beim Vergleich der Gegenstrahlung gemessen im Bestand und oberhalb der Baumkrone. Ein nicht unerheblicher Teil der langwelligen Energie bleibt durch die Gegenstrahlung des Kronendaches auch bei Ausstrahlungsnächten im Bestand erhalten.



**Abbildung 21:** Korrigierte Zeitreihen am Messstandort Waldstein Weidenbrunnen (775 m ü. NN), WALDATEM-2003 Experiment, Zeitausschnitt 18. Juli bis 23. Juli 2003. Vertikalprofil der Lufttemperatur (oben), eLWTmp = Temperatur langwellige Ausstrahlung ( $\varepsilon=0.99$ ), TPt = Trockentemperatur vent. Psychrometer in entsprechenden Höhen in Metern über Grund im und über dem Fichtenforst (Baumhöhe 19 m); horizontale Windgeschwindigkeit (Mitte) im Bestand (2 m) im Kronenraum (18 m) und oberhalb Bestand (32 m); Stabilitätsbedingung  $\zeta = z/L$  ( $z$  = aerodynamische Höhe,  $L$  = Obukhov-Länge) gemessen auf 33 m Höhe über Grund (Lüers et al., 2004).

Exemplarisch für eine typische sommerliche Situation wurden für Abbildung 21 die Tage vom 18. Juli bis 23. Juli 2003 ausgewählt. Die korrigierten und untereinander synchronisierten Zeitreihen der Lufttemperatur (oben), der horizontalen Windgeschwindigkeit in verschiedenen Messhöhen (Mitte) und die Stabilitätsbedingung über dem Bestand (unten, dargestellt als  $\zeta = (z-d)/L$ ;  $z-d$  = aerodynamische Höhe,  $L$  = Obukhov-Länge), zeigen das Beispiel einer neuerlichen Erwärmungsphase nach Durchzug einer kurzen, Regenschauer bringenden Kaltfront, die die voran gegangene Hitzeperiode nur am 17. Juli 2003 unterbrach.



**Abbildung 22:** Chronologische Vertikalprofile (im Original 10 min Mittel sechs verschiedener Messhöhen) der Lufttemperatur am Messstandort Waldstein Weidenbrunnen (775 m ü. NN), WALDATEM-2003 Experiment. Zeitausschnitt 18. Juli bis 21. Juli 2003. Zweidimensionale Interpolation der Zwischenwerte: vertikale Werteachse Interpolation nach Akima (1970), Zeitachse symmetrische Glättung. Höhe der Baumkronenoberkante 19 m (Lüers et al., 2004).

Vergleichend zur Abbildung 21 ist in Abbildung 22 der Temperaturverlauf im Wald durch eine zweidimensionale Interpolation der chronologischen Vertikalprofile der Lufttemperaturen aus sechs verschiedenen Messhöhen zusammenhängend dargestellt. In der Nacht zum 19.07. entwickelte sich zwischen 21 Uhr MEZ und 7 Uhr MEZ eine extrem starke Inversion innerhalb des Fichtenforstes aus, mit einer scharfen Grenze exakt im Kronenraum.

Diese Differenzierung ist nicht nur im Temperaturprofil verfolgbar, sondern bestätigt sich auch durch deutlich stabile Bedingungen oberhalb der Baumkronen (Abbildung 21, unten) und einer höheren Windgeschwindigkeit in 2 m ü. G. als direkt im Kronenbereich in 18 m ü. G. (Abbildung 21, Mitte). Solch eine starke Inversion (Temperaturdifferenz Stammraum zum Kroneninnern von über 4 K) kam während des Experimentes interessanterweise bevorzugt in einer Ausstrahlungsnacht nach einem kühleren Tag mit Schauerereignissen zustande. Am 19.07. und 20.07. lässt sich ein typischer mikrometeorologischer Effekt mit pflanzenphysiologischer Bedeutung verfolgen, wobei sich beginnend kurz nach Mittag bis in den Nachmittag (~18 Uhr MEZ) der Kronenbereich deutlich als Wärmeinsel im Profil abzeichnet. Bezeichnend ist das regelmäßige, recht abrupte Ende ab 18 Uhr MEZ, das sich anschaulich im merklichen Abflauen der Winde im gan-

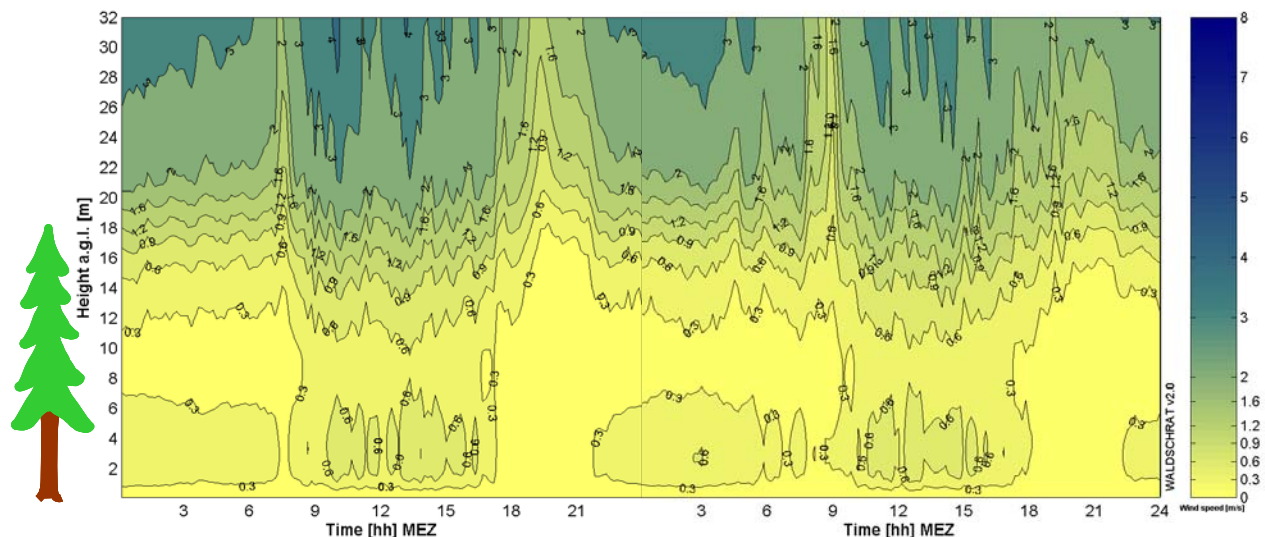
zen Profil durchpaust und den scharfen Übergang von einer nachmittäglichen labilen in eine stabile Schichtung am Abend markiert (Abbildung 21).

Nicht jede Strahlungsnacht weist eine solche Entkoppelung zwischen der Luft im Bestand und der Atmosphäre oberhalb auf. Eine deutlich erhöhte Windgeschwindigkeit (Abbildung 21, Mitte) in der Nacht zum 21.07. – möglicherweise durch orographisch geprägte (Kanalisation) Ausgleichsströmungen in tropisch warmen (20 °C) Nächten hervorgerufen – führen zu einer Auflösung der abendlichen Inversion und einer Durchmischung bis zum Waldboden.

Ein weiteres sommerspezifisches Phänomen mit nicht unerheblicher Wirkung auf das Waldökosystem konnte während des Experimentes mehrfach lückenlos messtechnisch dokumentiert werden. So zeigt der 21. Juli den abrupten turbulenten Einbruch in den Waldbestand durch ein heftiges, aber kurzlebiges Gewittersturmereignis am Nachmittag (zumeist pünktlich zwischen 13 Uhr und 15 Uhr MEZ) und – wiederholt im Extremsommer 2003 – mit anschließenden isothermen Bedingungen bei einer nächtlichen Temperatur um 20 °C (tropische Nacht).

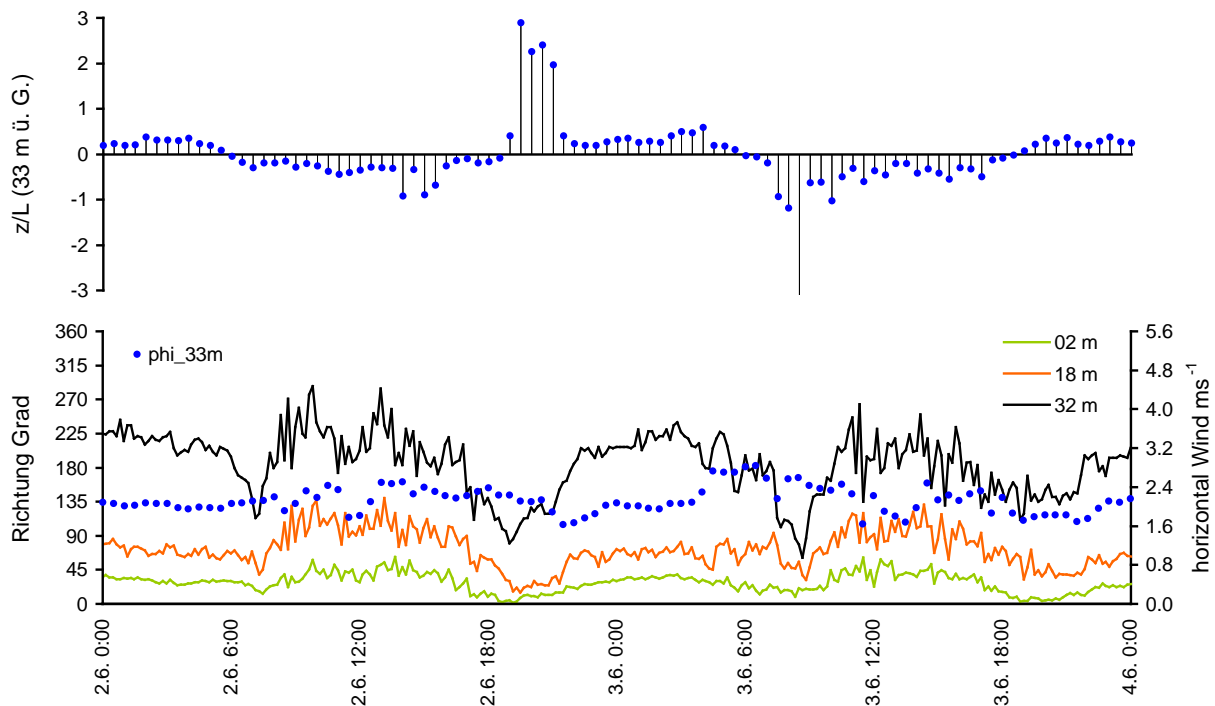
Das Beispiel in Abbildung 23 und Abbildung 24 vom 02. Juni und 03. Juni 2003 (heiße, sonnige Sommertage) soll ein typisches Muster im Tagesgang der Vertikalprofile der horizontalen Windgeschwindigkeit im Fichtenforst am Weidenbrunnen während der Sommermonate näher erläutern. Wie bei den Temperaturprofilen und bei den Julitagen zuvor zeigen sich hier besonders deutlich die markanten Zeitpunkte am Abend (18 Uhr bis 19 Uhr MEZ) und am Morgen (7:00 Uhr bis 8:00 Uhr MEZ), die die Phasen überwiegend stabiler und labiler Zustände eingrenzen.

Der abendliche Zusammenbruch der dynamisch generierten Turbulenz und die beginnende Entkopplung verdeutlicht sich im Abflauen des Windes über das ganze Profil und nahezu windstille Bedingungen im Waldbestand über die erste Nachthälfte hinweg bis es im Mittel der relevanten Fälle erst kurz nach Mitternacht zu einer Ausbildung eines sekundären Windmaximums im Stammraum zwischen 2 m und 6 m kommt. In der Regel sind diese sekundären Maxima gebunden an das Auftreten des nächtlichen Temperaturminimums am gleichen Ort und zur gleichen Zeit. Erst nach der zuvor beschriebenen Verzögerung von gut drei Stunden nach astronomischem Sonnenaufgang (gegen 4:30 Uhr MEZ) setzt sich die strahlungsforcierte atmosphärische Turbulenz gegen 7:30 Uhr MEZ bis zum Waldboden durch und führt zu einer rasch einsetzenden Kopplung und Durchmischung der Luftschicht im Bestandesinneren.



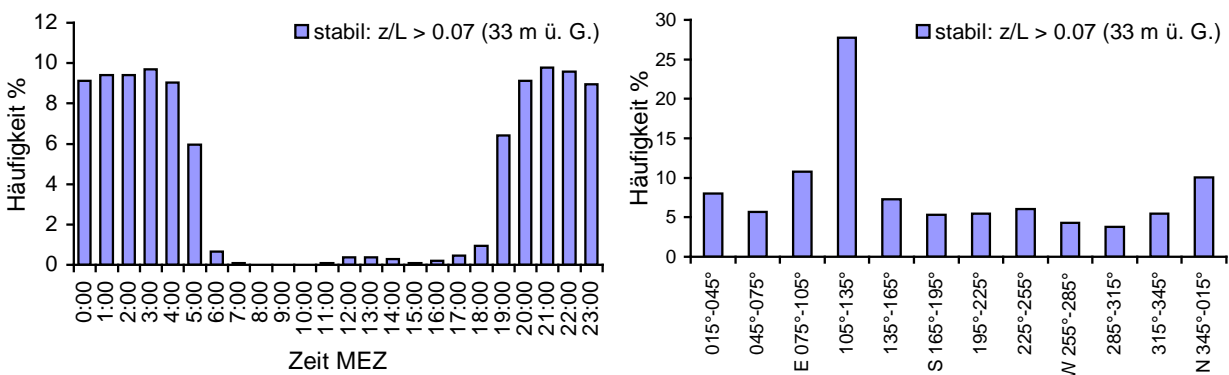
**Abbildung 23:** Chronologische Vertikalprofile (im Original 10 min Mittel sieben verschiedener Messhöhen) der horizontalen Windgeschwindigkeit (Schalensternanemometer) am Messstandort Waldstein Weidenbrunnen (775 m ü. NN), WALDATEM-2003 Experiment, Zeitausschnitt 02. Juni bis 03. Juni 2003. Zweidimensionale Interpolation der Zwischenwerte: vertikale Werteachse Interpolation nach Akima (1970), Zeitachse symmetrische Glättung. Höhe der Baumkronenoberkante 19 m (Lüers et al., 2004).



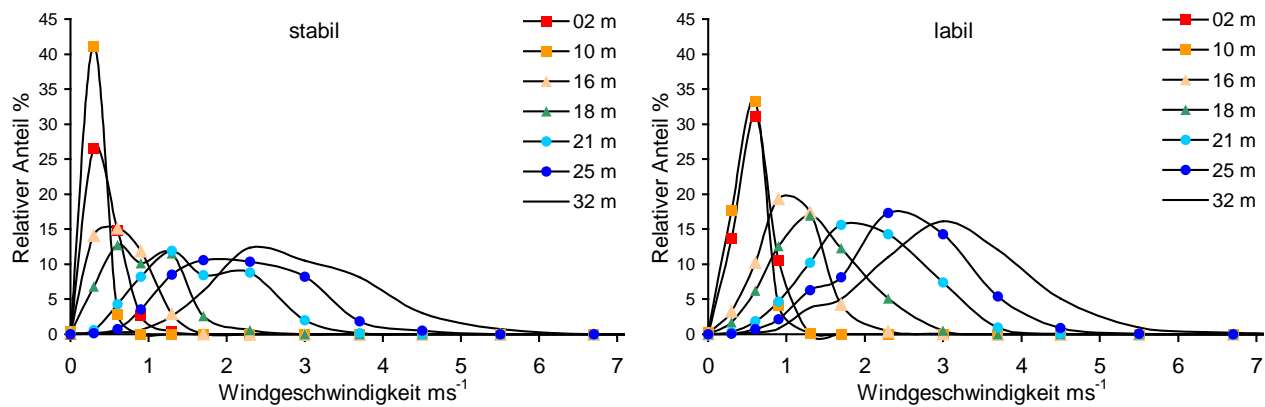


**Abbildung 24:** Korrigierte und synchronisierte Zeitreihen, Messstandort Waldstein Weidenbrunnen (775 m ü. NN), WALDATEM-2003 Experiment, Zeitausschnitt 02. Juni und 03. Juni 2003. Stabilitätsbedingung  $\zeta = z/L$  ( $z$  = aerodynamische Höhe,  $L$  = Obukhov-Länge) gemessen auf 33 m Höhe über Grund (oben), horizontale Windgeschwindigkeit im Bestand (2 m) im Kronenraum (18 m) und oberhalb Bestand (32 m) und Windrichtung  $\varphi$  in 32 m (unten). Lüers et al., 2004.

Bestätigung findet dieses Tagesgangmuster ebenfalls durch die Häufigkeitsanalyse der stabilen und labilen Einzelfälle bezüglich ihres Auftretens zu einer bestimmten Tageszeit. In Abbildung 25 links ist der mittlere Tagesgang stabiler Zustände in der Höhe der Turbulenzmessstation in 33 m aufgetragen, ein nahezu identisches Bild ergibt sich ebenfalls anhand der Turbulenzmessungen in 2.25 m ü. G. im Bestand. Interessanter Weise ist dieses Muster auffällig gebunden an großräumige Anströmungen aus Ostsüdost (Sektor 105° bis 135°).



**Abbildung 25:** Häufigkeitsanalyse stabiler Situationen ( $\zeta > 0.07$ ,  $z/L$ ,  $z$  = aerodynamische Höhe,  $L$  = Obukhov-Länge) am Messstandort Waldstein Weidenbrunnen (775 m ü. NN), WALDATEM-2003 Experiment, Zeitausschnitt 21. Mai bis 31. Juli 2003. Links: Relative Häufigkeit stabiler atmosphärischer Schichtung oberhalb der Baumbestandes bezüglich der Tageszeit und rechts Vorkommen stabiler Lagen in Abhängigkeit der Windrichtung (zwölf 30° Sektoren) in 33 m ü. G. (Lüers et al., 2004).

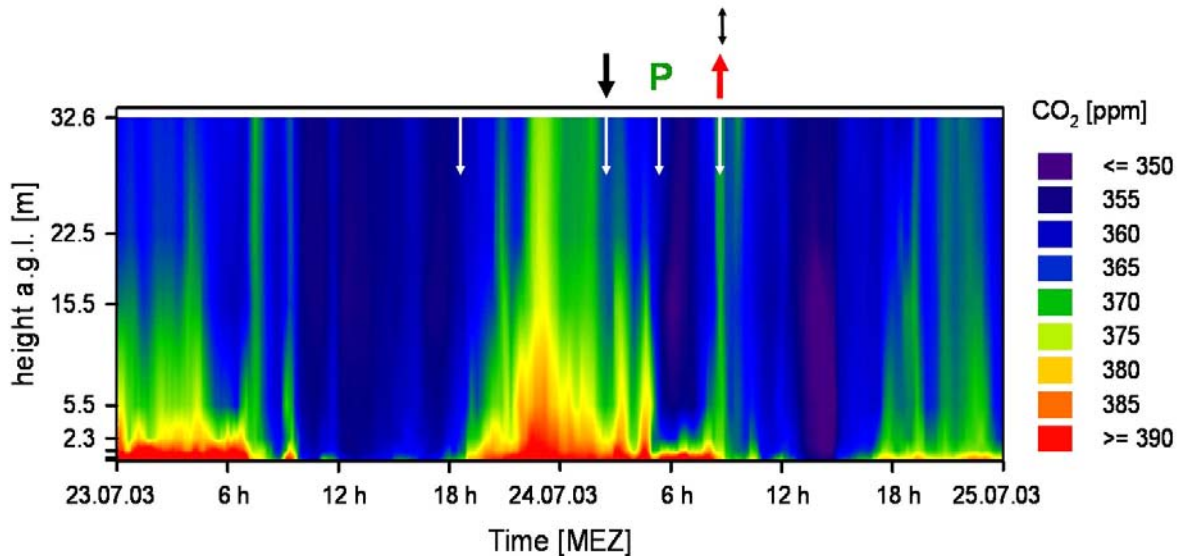


**Abbildung 26:** Spektrum der Windgeschwindigkeitsverteilung in verschiedenen Messhöhen in Metern ü. G. und sortiert nach stabilen ( $z/L > 0.07$ ) und labilen ( $z/L < -0.07$ ) Bedingungen am Messstandort Waldstein Weidenbrunnen (775 m ü. NN), WALDATEM-2003 Experiment, Zeitausschnitt 21. Mai bis 31. Juli 2003. Höhe der Baumkronenoberkante 19 m (Lüers et al., 2004).

Fast 30 % aller Windrichtung bei einer stabilen Schichtung entsprechen diesem Sektor (Abbildung 25, rechts) und auch für die ausgewählte Situation vom 02. Juni und 03. Juni 2003 (Abbildung 24, unten) ergab sich eine beständige Anströmung aus Südost. Die restlichen Prozente verteilen sich gleichmäßig zu geringen Anteilen auf die übrigen Windrichtungssektoren. Die in Abbildung 26 durchgeführte Analyse klassifiziert grob die je nach Messhöhe auftretende Windgeschwindigkeit in entsprechende Häufigkeitsspektren. Die Klasseneinteilung der Geschwindigkeit entspricht einer logarithmischen Einteilung angelehnt an das über den Gesamtzeitraum gemittelte Windprofil. Im stabilen Fall bleibt das Spektrum der Windgeschwindigkeit in 2 m und 10 m ü. G. eng begrenzt auf eine maximale Geschwindigkeit kleiner  $1.0 \text{ m s}^{-1}$ , wobei – wie auch noch deutlicher bei einer Tag/Nacht Sortierung – auffällt, dass in Messhöhe 10 m (Stammraummitte) die geringste Geschwindigkeit auftritt. Im labilen Fall verschiebt sich das Spektrum der beiden unteren Messhöhen nur leicht Richtung einer höheren Geschwindigkeit. Deutlicher wird der Unterschied zwischen stabiler und labiler Lagen in den Messhöhen 16 m (unterer Kronenbereich) und 18 m (oberer Kronenbereich). Für die Messhöhen 21 m und 25 m (kurz oberhalb Kronenbereich) und schließlich für die Höhe 32 m nehmen die Anteile höherer Geschwindigkeiten und die Varianz der Werte erwartungsgemäß mit wachsender Entfernung zur Unterlage und stärkerer Labilität zu.

Als abschließendes Beispiel zeigt die Abbildung 27 den chronologischen Verlauf der Vertikalprofile der Kohlendioxidkonzentration am Messstandort Weidenbrunnen für die zwei Tage 23. Juli und 24. Juli 2003. Kohlendioxid ist ein wichtiger Indikator für physiologische Aktivitäten im Ökosystem. Neben der Kohlendioxidflussmessung mittels der Ultraschallanemometer und der hochauflösenden Gasanalysatoren (Ruppert et al. 2004) wurde ein gemitteltes Vertikalprofil zur kontinuierlichen Bestimmung der Kohlendioxidkonzentration in und über dem Wald betrieben. Dazu wurden am Hauptturm in acht verschiedenen Höhen Gasansaugleitungen installiert und an einen zentralen Gasanalysator (LI-820, Li-Cor Inc.) angeschlossen. Diese Profilanlage wurde an der Abteilung Mikrometeorologie im Jahre 2003 selbst entwickelt und 2004 für einen schnellen, mobilen Einsatz erheblich weiterentwickelt.

In Übereinstimmung mit den vorherigen Beobachtungen zeigt sich nach der Entkopplung der Bestandsschicht von der freien Atmosphäre und Ausbildung stabiler Bedingungen ab 18 Uhr MEZ eine nächtliche Anreicherung der bodennahen Luftschicht mit  $\text{CO}_2$  produziert durch Atmungsprozess der Bodenorganismen.



**Abbildung 27:** Chronologische Vertikalprofile (im Original 8 min Mittel acht verschiedener Messhöhen) der Kohlendioxidkonzentration in ppm (Gasanalysator Li-Cor LI-820,) am Messstandort Waldstein Weidenbrunnen (775 m ü. NN), WALDATEM-2003 Experiment, Zeitausschnitt 23. Juli und 24. Juli 2003. Die weißen Pfeile markieren entsprechende Zeitpunkte, der abwärts gerichtete Pfeil oberhalb der Graphik markiert den Zeitpunkt eines nächtlichen Eintrages CO<sub>2</sub>-armer, frischer Luft, der aufwärts gerichtete Pfeil (rechts neben dem P) den Zeitpunkt der morgendlichen Speicherentleerung unter gekoppelter (Doppelpfeil) Durchmischungsbedingung. Das P markiert den Zeitpunkt einsetzender Photosyntheseleistung der Waldpflanzen (Lüers et al., 2004).

Nicht untypisch wird durch einen kurzen Zusammenbruch gegen 2:30 Uhr MEZ CO<sub>2</sub>-arme, frische Luft in den Bestand eingemischt. Mit Start der Photosyntheseleistung der Bäume ab etwa 5:00 Uhr MEZ zeigt sich typischerweise eine sehr rasche Abnahme der Kohlendioxidkonzentration in der Kronenschicht, während in der bodennahen Schicht aufgrund der Verzögerung von drei Stunden die nächtlich angereicherte Kohlendioxidkonzentration erst gegen 8:30 Uhr MEZ durch einen plötzlichen Durchbruch aus dem Bestand gemischt werden (siehe weiterführend Ruppert et al. 2004).

## 4. Veröffentlichungen

### 4.1 Publikationen in Zeitschriften mit Review-System 2001 bis 2004

2001

Held, A; Klemm, O; Hinz, K-P; Trimborn, P; Spengler, B (2001): Chemical classes of atmospheric aerosol particles at a rural site in Central Europe during winter, *J. Aerosol Sciences*, **33**, 581-594.

Klemm, O (2001): Local and Regional Ozone: A Student Study Project. *Journal of Chemical Education*, **78**, 1641-1646.

Klemm, O and Mangold, A (2001): Deposition of ozone at a forest site in NE Bavaria. *Water, Air, and Soil Pollution*, **1**, 223-232.

Klemm, O; Milford, C; Sutton, MA; van Putten, E; Spindler, G (2001): A climatology of leaf surface wetness, *Theoretical and Applied Climatology*, **71**, 107-117.

Römpp, A; Fricke, W; Klemm, O and Frank, H (2001): Haloacetates in Fog and Rain. *Environmental Science and Technology*, **35**, 1294-1298.



2002

- Burkard, R; Eugster, W; Wrzesinsky, T & Klemm, O (2002): Vertical divergences of fog water fluxes above a spruce forest. *Atmospheric Research* **64**, 133-145.
- Held, A; Hinz, K-P; Trimborn, A; Spengler, B & Klemm, O (2002): Chemical classes of atmospheric aerosol particles at a rural site in Central Europe during winter. *Journal of Aerosol Science* **33**, 581-594.
- Held, A; Wrzesinsky, T; Mangold, A; Gerchau, J & Klemm, O (2002): Atmospheric phase distribution of oxidized and reduced nitrogen at a forest ecosystem research site. *Chemosphere*, **48**, 697 -706.
- Klemm, O; Milford, C; Sutton, MA; van Putten, E; Spindler, G (2002): A climatology of leaf surface wetness. *Theoretical and Applied Climatology*, **71**, 107-117.
- Schröter, M; Obermeier, A; Brüggemann, D & Klemm, O (2002): Application of Ground-Based Lidar for Studies of the Dynamics of Ozone in a Mountainous Basin. *Environmental Science and Pollution Research*, **9**, 381-384.
- Thalmann, E; Burkard, R; Wrzesinsky, T; Eugster, W & Klemm, O (2002): Ion fluxes from fog and rain to an agricultural and a forest ecosystem in Europe. *Atmospheric Research*, **64**, 147-158.

2003

- Held, A; Hinz, K-P; Trimborn, A; Spengler, B; Klemm, O (2003): Towards direct measurement of turbulent vertical fluxes of compounds in atmospheric aerosol particles. *Geophysical Research Letters*, Vol. 30, No. **19**, 1-4.
- Junk, J; Helbig, A; Lüers, J (2003): Urban Climate and Air Quality at Trier, Germany, *International Journal of Biometeorology*, **47**: 230-238.
- Liebenthal, C and Foken, T (2003): On the Significance of the Webb Correction to Fluxes, *Boundary-Layer Meteorology*, **109**: 99-106.
- Schröter, M; Obermeier, A; Brüggemann, D; Plechschmidt, M; Klemm, O (2003): Remote monitoring of air pollutant emissions from point sources by a mobile LIDAR/SODAR system. *J. of the Air and Waste Management Association*, **53**, 716-723.

2004/2005

- Foken, T and Leclerc, MY (2004): Methods and limitations in validation of footprint models, *Agricultural and Forest Meteorology*, (accepted).
- Göckede, M; Markkanen, T; Hasager, CB and Foken, T (2005): Use of footprint modelling for the characterisation of complex measurement sites. *Boundary-Layer Meteorol.*, (submitted).
- Göckede, M; Rebmann, C and Foken, T (2004): A combination of quality assessment tools for eddy covariance measurements with footprint modelling for the characterisation of complex sites. *Agric. For. Meteorol.*, (in print).
- Held, A and Klemm, O (2005): Direct measurement of turbulent particle exchange between a coniferous forest and the atmosphere. *Atmos. Environment*, (submitted).
- Held, A; Nowak, A; Birmili, W; Wiedensohler, A; Forkel, R and Klemm, O (2005): Observations of particle formation and growth in a mountainous forest region in central Europe. *J. Geophys. Res.*, (accepted).
- Huang, J-H; Klemm, O (2004): Atmospheric speciation of ionic organotin, organolead and organomercury compounds in NE Bavaria (Germany), *Atmospheric Environment*, **38**, 5013-5023.
- Klemm, O; Held, A and BEWA2000-Team (2005): Experiments on forest/atmosphere exchange: Climatology and fluxes during two summer campaigns in NE Bavaria. *Atmospheric Environment*, (submitted).
- Liebenthal, C; Foken, T (2004): On the significance of the Webb correction to fluxes, *Corrigendum, Boundary-Layer Meteorology*, **113**, 301.
- Rebmann, C; Göckede, M; Foken, T; Aubinet, M; Aurela, M; Berbigier, P; Bernhofer, C; Buchmann, N; Carrara, A; Cescatti, A; Ceulemans, R; Clement, R; Elbers, JA; Granier, A; Grünwald, T; Guyon, D; Havránková, K; Heinesch, B; Knohl, A; Laurila, T; Longdoz, B; Marcolla, B; Markkanen, T; Miglietta, F; Moncrieff, JB; Montagnani, L; Moors, E; Nardino, M; Ourcival, J-M; Rambal, S; Rannik, Ü; Rotenberg, E; Sedlak, P; Unterhuber, G; Vesala, T; Yakir, D (2005): Quality analysis applied on eddy covariance measurements at complex forest sites using footprint modelling, *Theoretical and Applied Climatology*, (accepted).
- Thomas, C and Foken, T (2005): Detection of long-term coherent exchange over spruce forest using Wavelet Analysis. *Theor. & Appl. Climatol.*, (accepted).

## 4.2 Sonstige Publikationen 2001 bis 2005

- Aubinet, M; Clement, R; Elbers, JA; Foken, T; Grelle, A; Ibrom, A; Moncrieff, JB; Pilegaard, K; Rannik, Ü; Rebmann, C (2003): Methodology for data acquisition, storage and treatment. In: R Valentini, R (Editor): *Fluxes of Carbon, Water and Energy of European Forests*, Ecological Studies Series **163**, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 9-35.
- Bernhofer, C, Aubinet, M, Clement, R, Grelle, A, Grünwald, T, Ibrom, A, Jarvis, P, Rebmann, C, Schulze, E-D, Tenhunen, JD (2003): Spruce forests (Norway and Sitka spruce, including Douglas fir): Carbon and water fluxes and Balances, eco-logical and ecophysiological determinants. In: Valentini, R (Editor): *Fluxes of Carbon, Water and Energy of European Forests*, Ecological Studies Series **163**, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 99-123.
- Brauer, M (2002): *Atmosphärenforschung am Waldstein*, Spektrum, Magazin der Universität Bayreuth 1/02, S. 9-11.

- Chmielewski, F-M und Foken, T (2003): Beiträge zur Klima- und Meeresforschung, Aus Anlass des 70. Geburtstages von Peter Hupfer, 272 S.
- Foken, T (2001a): Das Klima des oberen Egertales, Bayreuther Forum Ökologie, **90**, 109-112.
- Foken, T (2001b): Untersuchungen zum Klima im Waldsteingebiet, Bayreuther Forum Ökologie, **90**, 59-63.
- Foken, T (2002): Depositions- und Emissionsflüsse zwischen der Atmosphäre und der Erdoberfläche. Spektrum, Magazin der Universität Bayreuth, 1/02, 34-35.
- Foken, T (2003a): Angewandte Meteorologie, Mikrometeorologische Methoden. Springer, Heidelberg, 289 S.
- Foken, T (2003b): Besonderheiten der Temperaturstruktur nahe der Unterlage, In: F-M. Chmielewski und Th. Foken (Editors), Beiträge zur Klima- und Meeresforschung. Eigenverlag Chmielewski & Foken, Berlin und Bayreuth, 103-112.
- Foken, T (2003c) Editor: Lufthygienisch-Bioklimatische Kennzeichnung des oberen Egertales. Bayreuther Forum Ökologie, **100**: 69 + XLVIII S.
- Foken, T (2003d): Besonderheiten der Temperaturstruktur nahe der Unterlage, In: Chmielewski, F-M und Foken, T (Editors), Beiträge zur Klima- und Meeresforschung. Eigenverlag Chmielewski & Foken, Berlin und Bayreuth, 103-112.
- Foken, T (2004): Climate change in the Lehstenbach region. In: Matzner, E (Editor): Biogeochemistry of forested catchments in a changing environment: a German case study, Ecological Studies Vol. **172**, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Foken, T und Lüers, J (2003): Klimawandel in Oberfranken. Terra Nostra, **6**, 129-135.
- Foken, T und Rebmann, C (2002): Kohlenstoffflüsse in Waldökosystemen des Fichtelgebirges. Spektrum, Magazin der Universität Bayreuth, 1/02, S. 36.
- Foken, T; Göckede, M; Mauder, M; Mahrt, L; Amiro, BD; Munger, JW (2004): Post-field data quality control. In Lee, X; Massman, W; Law, B: Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurement and Analysis, Kluwer, Dordrecht, 181-208.
- Foken, T; Lüers, J; Lauerer, M; Aas, G (2004): Im Ökologisch-Botanischen Garten: Dem Klima auf der Spur. 28. S.
- Gerstberger, P; Foken, T; Kalbitz, K (2004): The Lehstenbach and Steinkreuz catchments in NE Bavaria. In: Matzner, E (Editor): Biogeochemistry of forested catchments in a changing environment: a German case study, Ecological Studies Vol. **172**, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Grießbaum, F (2002): Chemistry of Cloud Interstitial Aerosol Particles: Sample Collection for Ion Chromatography (IC), Scanning Electron Microscopy (SEM), and Carbon (TC, EC, BC and OC) analysis. Diplomarbeit Universität Bayreuth.
- Held, A (2004): Turbulenter Austausch, Bildung und Wachstum atmosphärischer Partikel über einem Fichtenwald. PhD thesis, Universität Münster, 148 S. [URN: urn:nbn:de:hbz:6-49659588209]
- Klemm, O (2002): Ozon--Deposition zum Wald: Benötigen wir eine Neubewertung? Spektrum, Magazin der Universität Bayreuth, 1/02, S. 38-40.
- Klemm, O (2004): Trace gases and particles in the atmospheric boundary layer at the Waldstein site: Present stat and historic trends. In: Matzner, E (Editor): Biogeochemistry of forested catchments in a changing environment: a German case study, Ecological Studies Vol. **172**, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Klemm, O und Held, A (2002): Vertical fluxes of particles and ozone above a forest. In: AFO 2002 Poster Abstracts – Statusseminar 2002, GSF München, 2002.
- Klemm, O; Mangold, A; Held, A (2004): Turbulent deposition of ozone to a mountainous forest ecosystem. In: Matzner, E (Editor): Biogeochemistry of forested catchments in a changing environment: a German case study, Ecological Studies Vol. **172**, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Klör, C (2002): Spektral- und Filterradiometrie zur Analyse von Photolysefrequenzen atmosphärischer Spurengase am Standort "Waldstein" im Fichtelgebirge. Diplomarbeit Universität Bayreuth.
- Lüers, J (2003): Agraklimatologische und phänologische Auswertungen anhand ausgewählter Klimaindikatoren für das Mittlere Moseltal, Terra Nostra, **6**: 285-290.
- Lüers, J und Foken, T (2004): Klimawandel in Oberfranken. Der Siebenstern, **73**, 149-153.
- Lüers, J; Thomas, C; Ruppert, J; Foken, T (2004): Wind-, Temperatur- und Kohlendioxidprofile in einem Fichtenforst während des WALDATEM-2003 Sommerexperimentes. Extended abstract, DACH Meteorologentagung 2004, Karlsruhe: 07.09.2004 - 10.09.2004.
- Mayer, JC (2005): Bestimmung von Grenzschichtstrukturen mittels SODAR/RASS-Messungen. Diplomarbeit Abt. Mikrometeorologie, Univ. Bayreuth (in Druck).
- Raabe, A und Foken, T (2003): Die Höhe der internen Grenzschicht im Windfeld nach einer sprunghaften Änderung der aerodynamischen Rauigkeit der Unterlage - Beispiel Küste. In: F. Chmielewski and T. Foken (Editors): Beiträge zur Klima und Meeresforschung. Eigenverlag, S. 227-237.
- Rebmann, C (2003): Kohlendioxid-, Wasserdampf und Energieaustausch eines Fichtenwaldes in Mittelgebirgslage in Nordostbayern. Dissertation, Univ. Bayreuth, 149 S.
- Rebmann, C (2004): Kohlendioxid-, Wasserdampf- und Energieaustausch eines Fichtenwaldes in Mittelgebirgslage in Nordostbayern. Bayreuther Forum Ökologie, **106**, 140 S.

- Rebmann, C; Anthoni, P; Falge, E; Göckede, M; Mangold, A; Subke, J-A; Thomas, C; Wichura, B; Schulze, ED; Tenhunen, J and Foken, T (2004): Carbon Budget of a Spruce Forest Ecosystem. In: Matzner, E (Editor): Biogeochemistry of forested catchments in a changing environment: a German case study, Ecological Studies Vol. **172**, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Ruppert, J; Thomas, C; Foken, T (2004): CO<sub>2</sub>- und <sup>13</sup>C-Isotopenfluss für die Untersuchung der Dynamik des CO<sub>2</sub>-Austausches zwischen Ökosystem und Atmosphäre. Extended abstract, DACH Meteorologentagung 2004, Karlsruhe: 07.09.2004 - 10.09.2004.
- Scheer, C (2002): Evaluierung eines Modells zur Nebeldeposition in Mittelgebirgen. Diplomarbeit Universität Bayreuth.
- Schröter, J; Ruppert, J; Delany, AC; Foken, T (2004): Horizontale advective Einflüsse auf den CO<sub>2</sub>-Austausch eines Fichtenbestandes. Extended abstract, DACH Meteorologentagung 2004, Karlsruhe: 07.09.2004 - 10.09.2004.
- Steinbrecher, R and the BEWA2000-Team (2004a): Regional biogenic emissions of reactive volatile organic compounds (BVOC) from forests: Process studies, modelling and validation experiments (BEWA2000). AFO Newsletter Sep. 2004, GSF, München, S. 7-10.
- Steinbrecher, R; Rappenglück, B; Hansel, A; Graus, M; Klemm, O; Held, A; Wiedensohler, A; Nowak, A (2004b): Vegetation-atmospheric interactions: The emissions of biogenic volatile organic compounds (BVOC) and their relevance to atmospheric particle dynamics. In: Matzner, E (Editor): Biogeochemistry of forested catchments in a changing environment: a German case study, Ecological Studies Vol. **172**, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Thomas, C und Foken, T (2004): Untersuchung dynamischer Eigenschaften kohärenter Strukturen über einem hohen Fichtenwald mittels Wavelet-Analyse. Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologen-Tagung, Karlsruhe, Germany. 7. bis 10. Sep. 2004 (pdf-Datei auf CD).
- Thomas, C; Ruppert, J; Lüers, J; Olesch, J; Bertolini, T; Mayer, JC; Schröter, J; Delany, AC and Foken, T (2004a): Komplexes Wald-Grenzschicht Experiment WALDATEM-2003. Extended abstract, DACH Meteorologentagung 2004, Karlsruhe: 07.09.2004 - 10.09.2004.
- Thomas, C; Ruppert, J; Lüers, J; Schröter, J; Mayer, JC; Bertolini, T (2004b): Documentation of the WALDATEM-2003 Experiment April, 28th to August 03rd 2003. Arbeitsergebnisse, Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie. Print, ISSN 1614-8916, Nr. **24**, 59. S.
- Wrzesinsky, T (2002): Nebelforschung im Fichtelgebirge. Spektrum, Magazin der Universität Bayreuth, 1/02, S. 37-38.
- Wrzesinsky, T (2004): Direkte Messung und Bewertung des nebelgebundenen Eintrags von Wasser und Spurenstoffen in ein montanes Waldökosystem. Univ. Bayreuth, Dissertationsschrift, 108 S.
- Wrzesinsky, T and Klemm, O (2000): Summertime Fog Chemistry at a Mountainous Site in Central Europe. Atmospheric Environment, **34**, 1487-1496.
- Wrzesinsky, T; Scheer, C; Klemm, O (2004): Fog deposition and its role in biogeochemical cycles of nutrients and pollutants. In: Matzner, E (Editor): Biogeochemistry of forested catchments in a changing environment: a German case study, Ecological Studies Vol. **172**, Springer, Berlin, Heidelberg.

### 4.3 Vorträge, Führungen 2001 bis 2004

2001

- Burkard, R; Wrzesinsky, T; Eugster, W and Klemm, O (2001): "Vertical flux divergence during fog deposition." 2nd International Conference on Fog and Fog Collection, 15-20 July, 2001, St. John's, Newfoundland, Canada.
- Klemm, O (2001): "Trends in Fog Composition at a Site in NE Bavaria." 2nd International Conference on Fog and Fog Collection, 15-20 July, 2001, St. John's, Newfoundland, Canada.
- Wrzesinsky, T; Thalmann, E; Burkard, R; Eugster, W and Klemm, O (2001): "Fog deposition of nutrients and pollutants to a montane forest site." 2nd International Conference on Fog and Fog Collection, 15-20 July, 2001, St. John's, Newfoundland, Canada.

2002

- Foken, Th 05. und 06. Juni 2002: "Klimawandel in Oberfranken." 2. Regionale Klimakonferenz, Anthropogen verursachter Klimawandel in Sachsen, Annaberg.
- Klemm, O August 2002: "Fog Chemistry and Deposition at a Forest Site in Germany." National Dong Hwa University, Hua Lien, Taiwan.

2003

- Foken, T. 07.02.2003: „Die Bedeutung der Trockendeposition für den Stickstoff- und Säureeintrag in Ökosysteme“. Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Halle (Saale).
- Foken, T. 31.03.2003: „Klimawandel in Oberfranken“. Oberfrankenausstellung, Hof.
- Foken, T and Sodemann, H 06.–11.04.2003: "Special Characteristics of the Temperature Structure near the Surface". EGU/AGU, Nizza.
- Foken, T. 18.06.2003: "Klimawandel in Bayreuth". Rotary-Club, Bayreuth.

- Foken, T. 23.06.2003: „Klimawandel in Oberfranken“. Tagung der Regierung von Oberfranken zum Klimaschutz, Bayreuth.
- Foken, T. 07.08.2003: „Klimawandel in Bayreuth. Der Globale Klimawandel ist da“. Bündnis 90/Die Grünen. Bildungszentrum Lindenhof, Bayreuth.
- Lüers, J. 09.07.2003: „Klimawandel in Bayern“. Didaktik der Geographie, Vortrag für die Schüler der Oberstufen Bayreuther Gymnasien, Universität Bayreuth.
- Lüers, J. 11.07.2003: Exkursion unter Leitung P. Gerstberger: Waldökosystemforschung im Fichtelgebirge (Biogeochemie terrestrischer Ökosysteme). Teilbereich: Meteorologische Messungen am Waldstein.
- Lüers, J. 14.07.2003: Fachliche Führung durch den Ökologisch-Botanischen Garten - Thema: „Meteorologische Messungen, Klimaschutz, Klimawandel“. Schüler der mittleren Klassen, Bayreuther Schulen, ÖBG Bayreuth.
- Lüers, J. 23.10.2003: „Klimawandel in Oberfranken“. Bürgerwaldforum 2003, Bildungszentrum Lindenhof.
- Lüers, J. 31.10.2003: „Agrarklimatologische und phänologische Auswertungen für das Mittlere Moseltal - Auswirkungen des Klimawandels auf den Weinbau.“ Tagungsvortrag 22. Treffen Arbeitskreis Klima - AK-Klima in Gladenbach, Hessen, 31.10.03 bis 2.11.03.
- Lüers, J. 06.11.2003: „Klimawandel in Oberfranken“. Gewässernachbarschaft Bayern, Kreis Wunsiedel 2003, Fichtelgebirgshalle Wunsiedel.
- Lüers, J. 08.11.2003: Fachliche Exkursion - Thema: „Meteorologische Messungen, Klimawandel und Forstwirtschaft im Fichtelgebirge“. Führung durch die Klimamessflächen des BITÖK, Standort Waldstein, ca. 80 Teilnehmer, Fichtelgebirgsverein e.V.
- Reithmaier L; Göckede M; Knohl, A; Buchmann, N and Foken, T 06.–11.04.2003: “Application of remote sensing methods for micrometeorological site evaluation”. EGU/AGU, Nizza.

#### 2004

- Foken, T (01.04.2004): Auswirkungen der Klimaveränderungen auf unsere heimischen Wälder. Jahreshauptversammlung der Forstbetriebsgemeinschaft Kernnath e.V., Kernnath.
- Foken, T (03.05.2004): Ausbreitung von Verkehrslärm. VCD, Bayreuth.
- Foken, T; Thomas, C; Ruppert, J; Lüers, J; Göckede, M (2004): Turbulent exchange processes in and above tall vegetation. Vortrag, 16th Symposium on Boundary Layers and Turbulence, Portland, ME: 09.08.2004 - 13.08.2004.
- Lüers, J; Thomas, C; Ruppert, J; Foken, T (08.09.2004): Wind-, Temperatur- und Kohlendioxidprofile in einem Fichtenforst während des WALDATEM-2003 Sommerexperimentes. Vortrag, DACH Meteorologentagung 2004, Karlsruhe: 07.09.2004 - 10.09.2004.
- Lüers, J (16.10.2004): Klimawandel und ökologische Messflächen am Waldstein. Inc. Exkursion zu den Messflächen am Waldstein. Bayer. Forstamt Weißenstadt und Ev. Luth. Heimvolkshochschule Bad Alexandersbad.
- Lüers, J; Thomas, C; Ruppert, J; Foken, T (30.10.2004): Wind-, Temperatur- und Kohlendioxidprofile in einem Fichtenforst während des WALDATEM-2003 Sommerexperimentes. Tagungsvortrag 23. Treffen Arbeitskreis Klima - AK-Klima in Eltville am Rhein, 29.10.2004 - 31.10.2004.

## 4.4 Poster 2001 bis 2004

#### 2001

- Burkard, R; Wrzesinsky, Th; Eugster, W and Klemm, O (2001): Quantification of fog deposition with two similar setups. 2nd International Conference on Fog and Fog Collection, 15-20 July, 2001, St. John's, Newfoundland, Canada.
- Eugster, W; Burkard, R; Klemm, O and Wrzesinsky, Th (2001): Fog deposition measurements with the Eddy Covariance Method. 2nd International Conference on Fog and Fog Collection, 15-20 July, 2001, St. John's, Newfoundland, Canada.
- Held, A and Klemm, O (2001): Phase distribution of oxidized and reduced nitrogen species in the ambient air. European Aerosol Conference, 3-7 September, 2001, Leipzig, Germany.
- Hottenroth, S; Römpf, A; Vökl, W; Wieprecht, W; Wrzesinsky, Th; Klemm, O and Frank, H (2001): Nitrophenols and Haloacetates in Fog and Rain. 2<sup>nd</sup> International Conference on Fog and Fog Collection, 15-20 July, 2001, St. John's, Newfoundland, Canada.
- Klemm, O. und Mangold, A. (2001): Ozon-Deposition an einem Waldstandort. Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologen-Tagung DACH 2001, 18. bis 21. September, Wien.

#### 2002

- Held, A and Klemm, O (2002): Vertical particle fluxes over a coniferous forest. In: Midgley, PM and Reuther, M (Eds.): Proceedings from the EUROTRAC-2 Symposium 2002.
- Held, A; Nowak, A; Wiedensohler, A and Klemm, O (2002): Measuring vertical particle fluxes over a coniferous forest using eddy covariance. International Aerosol Conference Taipeh, Taiwan.
- Klemm, O and Held, A (2002): Vertical fluxes of particles and ozone above a forest. AFO 2002 Statusseminar Schliersee, 2002.

- Klemm, O and Mangold, A (2002): Ozone Deposition at a Forest Site. In: Midgley, PM and Reuther, M (Eds.): Proceedings from the EUROTRAC-2 Symposium 2002.
- Schröter, M; Obermeier, A; Brüggemann, D and Klemm, O (2002): Remote Monitoring of the Emission and Dispersion of Air Pollutants from Point Sources by a Mobile Lidar/Sodar System. In: Midgley, PM and Reuther, M (Eds.): Proceedings from the EUROTRAC-2 Symposium 2002.
- Steinbrecher, R; Barnes, I; Forkel, R; Giersch C; Herrmann, H; Klemm, O; Kreuzwieser, J; Mohnen, V; Moortgat, G; Müller, K; Rappenglück, B; Rennenberg, H; Schnitzler, J-P; Smiatek G; Weitz, A and Zimmer, W (2002): Regional Biogenic Emissions of Reactive Volatile Organic Compounds (BVOC) from Forests: Process Studies, Modelling and Validation Experiments (BEWA2000). In: Midgley, PM and Reuther, M (Eds.): Proceedings from the EUROTRAC-2 Symposium 2002.

## 2003

- Bange, J; Berger, FH; Beyrich, F; Bösenberg, J; Foken, T; Mengelkamp, H-T; Raasch, S; Simmer, C (2003): Regional evaporation at grid/pixel scale. DEKLIM Status-Seminar, Bad Münstereifel 06. bis 08.10.2003.
- Foken, T und Lüers, J (2003): Klimawandel in Oberfranken. Poster 6. Deutsche Klimatagung in Potsdam, 22.9.03 bis 25.9.03.
- Foken, T und Lüers, J (2003): Klimawandel in Oberfranken. Poster 22. Treffen Arbeitskreis Klima „AK-Klima“ in Gladenbach, Hessen, 31.10.02 bis 2.11.03.
- Göckede, M; Rebmann, C; Foken, T (2003): Use of footprint modelling for the characterisation of complex meteorological flux measuring sites. EGU/AGU, Nizza, 06. bis 11.04.2003.
- Lüers, J (2003): Agrarklimatologische und phänologische Auswertungen für das Mittlere Moseltal - Auswirkungen des Klimawandels auf den Weinbau. Poster 6. Deutsche Klimatagung in Potsdam, 22.9.03 bis 25.9.03.
- Mauder, M und Foken, T (2003): Regional evaporation at grid/pixel scale. In-situ measurement and its transfer to model-scales. DEKLIM Status-Seminar, Bad Münstereifel 06. bis 08.10.2003.

## 2004

- Foken, T und Lüers, J (2004): Klimastationen der Universität Bayreuth. Poster, „Wald.Holz.Umwelt“-Ausstellung der Forstdirektion Oberfranken-Mittelfranken, Marktplatz Stadt Bayreuth: 06.10.2004 - 09.10.2004.
- Foken, T; Thomas, C; Lüers, J; Ruppert, J; Göckede, M (2004): Turbulent Exchange Processes in and Above Tall Vegetation. Poster, The FLUXNET 2004 Open Workshop, Florence: 13.12.2004 - 15.12.2004.
- Foken, T; Thomas, C; Ruppert, J; Lüers, J; Göckede, M (2004): Turbulent Exchange processes in and above tall vegetation. Poster, 26th Conference on Agricultural and Forest Meteorology, Vancouver, British Columbia, Canada: 23.08.2004 - 26.08.2004.
- Liebenthal, C; Foken, T (2004): Wie sicher sind Ergebnisse für den Bodenwärmestrom? Poster, DACH Meteorologentagung 2004, Karlsruhe: 07.09.2004 - 10.09.2004.
- Lüers, J; Thomas, C; Ruppert, J; Bertolini, T; Foken, T (2004): Wind, air temperature and CO<sub>2</sub> profiles of a tall spruce forest during WALDATEM-2003 summer experiment. Poster, European Geosciences Union, 1st General Assembly, Nice: 25.04.2004 - 30.04.2004.
- Mayer, JC; Thomas, C; Foken, T (2004): Dynamik des Wind- und Temperaturprofils an einem Mittelgebirgsstandort mittels Sodar-RASS. Poster, DACH Meteorologentagung 2004, Karlsruhe: 07.09.2004 - 10.09.2004.
- Ruppert, J; Mauder, M; Lüers, J; Foken, T (2004): New Gap Filling Approach For Eddy Covariance Data. Poster, The FLUXNET 2004 Open Workshop, Florence: 13.12.2004 - 15.12.2004.
- Thomas, C; Ruppert, J; Lüers, J; Olesch, J; Bertolini, T; Mayer, JC; Schröter, J; Delany, AC; Foken, T (2004): Komplexes Wald-Grenzschicht-Experiment WALDATEM-2003. Poster, DACH Meteorologentagung 2004, Karlsruhe: 07.09.2004 - 10.09.2004.

## 5. Zitierte Publikationen

- Akima, H (1970): A new method of interpolation and smooth curve fitting based on local procedures. *Journal of the ACM*, **17**(4):589-602.
- Alexandersson, H (1986) A homogeneity test applied to precipitation data. *J. of Climatology*, **6**: 661-675.
- Aubinet, M et al. (2000): Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: The EUROFLUX methodology. *Adv Ecol Res*, **30**: 113-175.
- Birmili, W; Stratmann, F und Wiedensohler, A (1999): Design of a DMA-based size spectrometer for a large particle size range and stable operation. *J. Aerosol Sci.*, **30**, 549-553.
- Buzorius, G; Rannik, Ü; Mäkelä, JM; Vesala, T and Kulmala, M (1998): Vertical aerosol particle fluxes measured by eddy covariance technique using condensational particle counter. *J. Aerosol Sci.*, **29**, 157-171.
- Daube Jr., BC; Flagan, RC and Hoffmann, MR (1987): Active Cloudwater Collector. United States Patent No. 4697462.
- Demoz, BB; Collett Jr, JL and B. C. Daube Jr. BC (1996): On the Caltech Active Strand Cloudwater Collectors. *Atmospheric Research*, **41**, 47-62.
- Foken, T (2003a): *Angewandte Meteorologie, Mikrometeorologische Methoden*. Springer, Heidelberg, 289 S.
- Foken, T (2003c) Editor: *Lufthygienisch-Bioklimatische Kennzeichnung des oberen Egertales*. Bayreuther Forum Ökologie, **100**: 69 + XLVIII S.
- Foken, T and Leclerc, MY (2004): Methods and limitations in validation of footprint models, *Agricultural and Forest Meteorology*, (accepted).
- Foken, T und Lüers, J (2003): Klimawandel in Oberfranken. *Terra Nostra*, **6**, 129-135.
- Foken, T; Göckede, M; Mauder, M; Mahrt, L; Amiro, BD; Munger, JW (2004): Post-field data quality control. In Lee, X; Massman, W; Law, B: *Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurement and Analysis*, Kluwer, Dordrecht, 181-208.
- Foken, T; Lüers, J; Lauerer, M; Aas, G (2004): *Im Ökologisch-Botanischen Garten: Dem Klima auf der Spur*. 28. S.
- Göckede, M; Markkanen, T; Hasager, CB and Foken, T (2005): Use of footprint modelling for the characterisation of complex measurement sites. *Boundary-Layer Meteorol.*, (submitted).
- Göckede, M; Rebmann, C and Foken, T (2004): A combination of quality assessment tools for eddy covariance measurements with footprint modelling for the characterisation of complex sites. *Agric. For. Meteorol.*, (in print).
- Gower, ST and Norman, JM (1990): Rapid estimation of leaf area index in conifer and broad-leaf plantations. *Ecology*, **72**, 1896-1900.
- Grießbaum, F (2002): *Chemistry of Cloud Interstitial Aerosol Particles: Sample Collection for Ion Chromatography (IC), Scanning Electron Microscopy (SEM), and Carbon (TC, EC, BC and OC) analysis*. Diplomarbeit Universität Bayreuth.
- Handorf, D, Petoukhov, VK, Dethloff, K, Eliseev, AV, Weisheimer, A, Mokhov, II (1999): Decadal climate variability in a coupled atmosphere-ocean climate model of moderate complexity. *J Geophys Res* 104/D22: 27253-27276.
- Held, A (2004): *Turbulenter Austausch, Bildung und Wachstum atmosphärischer Partikel über einem Fichtenwald*. PhD thesis, Universität Münster, 148 S. [URN: urn:nbn:de:hbz:6-49659588209]
- Held, A and Klemm, O (2005): Direct measurement of turbulent particle exchange between a coniferous forest and the atmosphere. *Atmos. Environment*, (submitted).
- Held, A; Hinz, K-P; Trimborn, A; Spengler, B; Klemm, O (2003): Towards direct measurement of turbulent vertical fluxes of compounds in atmospheric aerosol particles. *Geophysical Research Letters*, Vol. 30, No. **19**, 1-4.
- Held, A; Nowak, A; Birmili, W; Wiedensohler, A; Forkel, R and Klemm, O (2005): Observations of particle formation and growth in a mountainous forest region in central Europe. *J. Geophys. Res.*, (accepted).
- Held, A; Wrzesinsky, T; Mangold, A; Gerchau, J & Klemm, O (2002): Atmospheric phase distribution of oxidized and reduced nitrogen at a forest ecosystem research site. *Chemosphere*, **48**, 697 -706.
- Kendall, MG (1970): *Rang correlation methods*. Griffin, London, 202 S.
- Klemm, O. und Lange, H. (1999): Trends of Air Pollution in the Fichtelgebirge Mountains, Bavaria, *Environmental Science & Pollution Research*, **6**: 193-199.
- Klemm, O; Held, A and BEWA2000-Team (2005): Experiments on forest/atmosphere exchange: Climatology and fluxes during two summer campaigns in NE Bavaria. *Atmospheric Environment*, (submitted).
- Klemm, O; Mangold, A; Held, A (2004): Turbulent deposition of ozone to a mountainous forest ecosystem. In: Matzner, E (Editor): *Biogeochemistry of forested catchments in a changing environment: a German case study*, *Ecological Studies* Vol. **172**, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Lüers, J und Foken, T (2004): Klimawandel in Oberfranken. *Der Siebenstern*, **73**, 149-153.
- Lüers, J; Thomas, C; Ruppert, J; Foken, T (2004): Wind-, Temperatur- und Kohlendioxidprofile in einem Fichtenforst während des WALDATEM-2003 Sommerexperimentes. Extended abstract, DACH Meteorologentagung 2004, Karlsruhe: 07.09.2004 - 10.09.2004.
- Mäkelä, JM; Aalto, P; Jokinen, V; Pohja, T; Nissinen, A; Palmroth, S; Markkanen, T; Seitsonen, K; Lihavainen, H and Kulmala, M (1997): Observations of ultrafine aerosol particle formation and growth in boreal forest. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 1219-1222.
- Mann, HB (1945): Nonparametric test against trends. *Econometrica*, **13**: 245-259.
- Mayer, JC (2005): *Bestimmung von Grenzschichtstrukturen mittels SODAR/RASS-Messungen*. Diplomarbeit Abt. Mikrometeorologie, Univ. Bayreuth (in Druck).

- Österle, H, Glauer, J, Denhard, M (1999): Struktur, Aufbau und statistische Programmbibliothek der meteorologischen Datenbank am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung. PIK-Rep 49: 107 S.
- Rapp, J (2000): Konzeption, Problematik und Ergebnisse klimatologischer Trendanalysen für Europa und Deutschland. Ber. Dt. Wetterdienst, **212**: 145 S.
- Rebmann, C (2004): Kohlendioxid-, Wasserdampf- und Energieaustausch eines Fichtenwaldes in Mittelgebirgslage in Nordostbayern. Bayreuther Forum Ökologie, **106**, 140 S.
- Rebmann, C; Anthoni, P; Falge, E; Göckede, M; Mangold, A; Subke, J-A; Thomas, C; Wichura, B; Schulze, ED; Tenhunen, J and Foken, T (2004): Carbon Budget of a Spruce Forest Ecosystem. In: Matzner, E (Editor): Biogeochemistry of forested catchments in a changing environment: a German case study, Ecological Studies Vol. **172**, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Ruppert, J; Thomas, C; Foken, T (2004): CO<sub>2</sub>- und <sup>13</sup>C-Isotopenfluss für die Untersuchung der Dynamik des CO<sub>2</sub>-Austausches zwischen Ökosystem und Atmosphäre. Extended abstract, DACH Meteorologentagung 2004, Karlsruhe: 07.09.2004 - 10.09.2004.
- Scheer, C (2002): Evaluierung eines Modells zur Nebeldeposition in Mittelgebirgen. Diplomarbeit Universität Bayreuth.
- Schönwiese, CD (2000): Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler. Gebr. Borntraeger, Berlin, Stuttgart: 298 S.
- Schröter, M; Obermeier, A; Brüggemann, D; Plechschmidt, M; Klemm, O (2003): Remote monitoring of air pollutant emissions from point sources by a mobile LIDAR/SODAR system. J. of the Air and Waste Management Association, **53**, 716-723.
- Staeger, T, Grieser, J, Schönwiese, C-D (2003): Statistical separation of observed global and European climate data into natural and anthropogenic signals. Climate Research, **24**: 3-13.
- Steinbrecher, R and the BEWA2000-Team (2004a): Regional biogenic emissions of reactive volatile organic compounds (BVOC) from forests: Process studies, modelling and validation experiments (BEWA2000). AFO Newsletter Sep. 2004, GSF, München, S. 7-10.
- Steinbrecher, R; Rappenglück, B; Hansel, A; Graus, M; Klemm, O; Held, A; Wiedensohler, A; Nowak, A (2004b): Vegetation-atmospheric interactions: The emissions of biogenic volatile organic compounds (BVOC) and their relevance to atmospheric particle dynamics. In: Matzner, E (Editor): Biogeochemistry of forested catchments in a changing environment: a German case study, Ecological Studies Vol. **172**, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Thomas, C; Ruppert, J; Lüers, J; Olesch, J; Bertolini, T; Mayer, JC; Schröter, J; Delany, AC and Foken, T (2004a): Komplexes Wald-Grenzschicht Experiment WALDATEM-2003. Extended abstract, DACH Meteorologentagung 2004, Karlsruhe: 07.09.2004 - 10.09.2004.
- Thomas, C; Ruppert, J; Lüers, J; Schröter, J; Mayer, JC; Bertolini, T (2004b): Documentation of the WALDATEM-2003 Experiment April, 28th to August 03rd 2003. Arbeitsergebnisse, Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie. Print, ISSN 1614-8916, Nr. **24**, 59. S.
- Torrence, C and Compo, GP (1998): A practical guide to wavelet analysis. Bull. Am. Meteorol. Soc., **79**: 61-78.
- Whatley, JM; Whatley, FR (1980). Light and Plant Life. London: Edward Arnold (Publishers) Limited.
- Wilks, DS (1995): Statistical Methods in the Atmospheric Sciences - An Introduction. Academic Press, San Diego, 467 S.
- Wrzesinsky, T (2002): Nebelforschung im Fichtelgebirge. Spektrum, Magazin der Universität Bayreuth, 1/02, S. 37-38.
- Wrzesinsky, T (2004): Direkte Messung und Bewertung des nebelgebundenen Eintrags von Wasser und Spurenstoffen in ein montanes Waldökosystem. Univ. Bayreuth, Dissertationsschrift, 108 S.
- Wrzesinsky, T and Klemm, O (2000): Summertime Fog Chemistry at a Mountainous Site in Central Europe. Atmospheric Environment, **34**, 1487-1496.

# Einflüsse kohärenter Strukturen auf den Energie- und Stoffaustausch in hohen Beständen

**Christoph Thomas, Thomas Foken**

**Weitere Mitarbeiter:** Johannes Ruppert, Johannes Lüers, Jens-Christopher Mayer, Matthias Göckede, Mathias Mauder, Johannes Olesch

## Zusammenfassung

In dem vorliegenden Projekt wurde der Beitrag kohärenter Strukturen zur Energie- und Stoffbilanz eines Waldökosystems untersucht. Die kohärenten Strukturen wurden in Rahmen des WALDATEM-2003 Experimentes mithilfe intensiver turmgestützter Messungen in und über dem Wald untersucht. Zusätzlich wurde auch ein akustisch fernerkundliches Sondierungsverfahren zur Erfassung der kohärenten Strukturen über dem Wald bis in eine Höhe von 115 m über Grund eingesetzt. Das WALDATEM-2003 Experiment wurde im Zeitraum Mai bis Juli 2003 am Waldstein auf den Teilflächen Weidenbrunnen und Pflanzgarten in enger Kooperation mit den Teilprojekten A3 und A6 durchgeführt. Zur automatischen Erkennung und Analyse der kohärenten Strukturen wurde ein Softwarepaket entwickelt, das auf dem mathematischen Verfahren der Wavelet-Transformation basiert.

Der zeitliche Abstand aufeinanderfolgender kohärenter Strukturen und ihre Größe weisen eine deutliche Abhängigkeit von der Windrichtung auf, die sich am Waldstein in die Hauptsektoren Nord, Südost und West einteilen lässt. Bei Anströmung aus dem Nord- Südostsektor weisen die kohärenten Strukturen eine deutliche Abhängigkeit ihrer dynamischen Eigenschaften von der Messhöhe auf. Der Westsektor hingegen ist durch sehr homogene Bedingungen unabhängig von der Messhöhe charakterisiert. Kohärente Strukturen haben einen mittleren Flussbeitrag von 10 % bis 20 % am Impulsaustausch und 20 % bis 30 % an den skalaren Flüssen der fühlbaren und latenten Wärme und des Kohlendioxidaustausches. Der momentane Flussbeitrag kann jedoch erheblich größer sein und in Einzelfällen bis zu 60 % betragen. Vor allem die starken, abwärtsgerichteten Bewegungsanteile der kohärenten Strukturen tragen bei neutraler bzw. leicht stabiler Schichtung in den Morgen- und Abendstunden zur Kopplung des Waldes mit der Atmosphäre bei. Das Regime des Austausches zwischen Wald und Atmosphäre durch kohärente Strukturen ist äußerst komplex und lässt bislang keine eindeutige Parametrisierung durch meteorologische Parameter zu. Über dem Wald konnte das gleichzeitige Vorkommen kleinskaliger und großskaliger kohärenter Strukturen nachgewiesen werden. Die kleinskaligen kohärenten Strukturen entstehen vermutlich durch Windscherung, die großskaligen hingegen weisen eine deutliche Abhängigkeit von der Strahlung und damit thermischen Prozessen auf. Erste Ansätze zur Modellierung des Austausches durch kohärente Strukturen mit der Transilientmatrix sind vielversprechend und sollen in weiteren Forschungsvorhaben weiterverfolgt werden. Die Ergebnisse der spektralen Analysen kohärenter Strukturen lassen eine Überprüfung der Annahme skalarer Ähnlichkeit zu und tragen somit zur zulässigen Verwendung indirekter Flussbestimmungsverfahren wie der Relaxed Eddy Accumulation (REA) entscheidend bei.

## Summary

This project investigated the contribution of coherent structures to the budgets of energy and matter in forested ecosystems. Observation of coherent structures was carried out mainly through tower-based measurements within and above the forest during the field experiment WALDATEM-2003. This experiment was conducted at the Waldstein Weidenbrunnen and Pflanzgarten sites in the Fichtelgebirge mountains in close cooperation with the projects A3 and



A7 during May to July 2003. Additionally, for the first time an acoustic sounding technique was applied to observing coherent structures above the forest up to 115 m above ground. An automated detection and analysis software tool for the coherent structures was developed, which uses the mathematical wavelet transform.

The mean temporal separation of adjacent coherent structures and the size was found to vary significantly with wind direction. The flow at the Weidenbrunnen site can be subdivided into winds from North, Southeast and West. In the northern and south-eastern sectors the dynamical properties of the coherent structures vary with observation height, whereas the western sector represents fairly homogeneous flow conditions. On average, coherent structures contribute about 10 % to 20 % to the momentum exchange and about 20 % to 30 % to the scalar fluxes of sensible and latent heat and carbon dioxide. Instantaneous contributions can increase up to 60 % of the overall flux. During near neutral and slightly stable stratification, the strong, downward directed phase of the coherent structures (sweeps) predominantly control the coupling between forest and atmosphere. The pattern of exchange through coherent structures is very complex. So far, a simple parameterisation of the exchange processes due to coherent structures seems unlikely. Above the forest, small-scale and large-scale coherent structures do exist simultaneously. The generation of the small-scale coherent structures is due to the strong wind shear near the canopy top. The large-scale coherent structures vary largely with incoming short-wave radiation and are thus assumed to be driven by thermal processes. First promising steps were made to modelling the exchange of coherent exchange using the transilient-matrix. This topic will be continued in future research work. The results of the spectral analyses of the coherent structures allow a verification of the assumption of scalar-similarity. Thus, the applicability of indirect flux determination can be controlled.

## **1. Fragestellung und Ziele des Teilprojektes**

In dem Projekt wurden die folgenden Hypothesen und Ziele verfolgt:

- Kohärente Strukturen sind als inhärente Erscheinung atmosphärischer Turbulenz wohl organisiert, d.h. sie weisen eine charakteristische Auftrittshäufigkeit und zeitliche und räumliche Ausdehnung auf. Im Vordergrund der Untersuchung stehen hierbei die langfristigen, statistischen Eigenschaften, die sich annähernd von meteorologischen Parametern ableiten lassen. Das Ziel des Projektes ist es, die charakteristischen Eigenschaften durch die Anwendung eines zu entwickelnden Softwaretools, das auf der Wavelet-Transformation beruht, aufzunehmen und durch meteorologische Variablen zu parametrisieren.
- Kohärente Strukturen leisten einen erheblichen Beitrag zur Stoff- und Energiebilanz von Ökosystemen, der durch die Anwendung der Eddy-Kovarianz-Methode nicht oder nur teilweise wiedergegeben wird. Die Abschätzung dieses Anteils ist zur Bewertung der Stoff- und Energieflüsse und deren Bilanzierung von grundlegender Bedeutung. Die Bestimmung des Beitrages soll durch ein geeignetes Verfahren erfolgen, das den Flussanteil der kohärenten Strukturen spektral lokalisiert bestimmt.
- Die Kenntnisse der statistischen Eigenschaften kohärenter Strukturen können herangezogen werden, um die Modellierung des Energie- und Stoffumsatzes in einem Waldökosystem mit nicht-lokaler Turbulenzschließung zu verbessern. Die Transilient-Matrix kann als Kernstück dieser Modellierung so modifiziert werden, dass sie bislang nicht erfasste Anteile der kohärenten Strukturen abbildet.
- Die Ergebnisse der vorangestellten Punkte lassen eine Neubewertung der Anwendbarkeit und Genauigkeit direkter Flussbestimmungsverfahren wie Eddy-Kovarianz-Methode und indirekter wie der Relaxed-Eddy-Accumulation Methode über und in einem Waldökosystem zu. Es sollen Qualitätskennzeichen zusätzlich zu den bereits verwendeten nach (Foken et al. (2004) abgeleitet werden, die die Aussagen der genannten Flussbestimmungsverfahren und einfacher Gradientansätze qualitativ verbessern.

## **2. Methoden**

Die Untersuchung der genannten Hypothesen und Ziele erfolgt einerseits auf der Datengrundlage der kontinuierlich betriebenen Flussmesstation am Standort Weidenbrunnen und andererseits auf der Durchführung der Intensivmesskampagne WALDATEM-2003. Zusätzlich zu den im Antrag genannten Untersuchungsmethoden wurde durch die Kooperation mit dem Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz ein aktives Verfahren zur akustischen Fernerkundung der Atmosphäre SODAR-RASS während WALDATEM-2003 eingesetzt. Die Notwendigkeit dazu ergab sich aus der Erkenntnis, dass auch nicht-lokale Parameter der atmosphärischen Grenzschicht einen Einfluss auf die Turbulenz in Bodennähe haben können (Högström, 1990; Johansson et al., 2001; Panofsky et al., 1977; Smedman, 1991; Tennekes, 1982). Das selbstentwickelte Softwarepaket WALDSCHRAT ist das zentrale Werkzeug zur Detektion und Analyse der kohärenten Strukturen.

### **2.1 Kontinuierliche Flussbestimmung mittels Eddy-Kovarianz-Methode**

Das System zur Erfassung der Datengrundlage basiert auf der Weiterführung der EUROFLUX-Station Weidenbrunnen DE-Wei (Gerstberger, 2001; Gerstberger et al., 2004; Rebmann, 2003; Rebmann et al., 2004) mit zusätzlichen mess- und gerätetechnischen Verbesserungen. Die turbulenten dreidimensionalen Windvektoren wurden kontinuierlich mit Hilfe eines Ultraschallanemometers Gill Solent R3-50 mit einer Probenahmefrequenz von 20 Hz erfasst, die hochfrequenten CO<sub>2</sub>- und H<sub>2</sub>O-Konzentrationen mit Hilfe des in diesem Projekt angeschafften Licor 7500 Open-path Gas-Analysers ebenfalls mit 20 Hz gemessen. Die Turbulenzdaten werden mit einem PC-System und der Software EDDYSOFT (Meteotools) aufgezeichnet und in Blöcken von jeweils 30 min Dauer abgespeichert. Die Qualitätssicherung wird nach Foken et al. (2004b) durchgeführt.

### **2.2 WALDATEM-2003 Experiment**

Das WALDATEM-2003 war das zentrale Experiment der Teilprojekte A6 und A7 unter intensiver Unterstützung und enger Vernetzung mit dem Teilprojekt A3. Der Name des Experimentes leitet sich von den verwendeten Mess- und Analysetechniken ab, wobei WALD für WAVElet Detection und ATEM für Atmospheric Turbulence Exchange Measurements steht. In dem Zeitraum von 21.05. bis 31.07.2003 wurden an der Station Weidenbrunnen intensive Turmmessungen und akustische Fernsondierungen in dem 19 m hohen Fichtenbestand durchgeführt. Durch die Kombination bodengestützter und fernerkundlicher Messsysteme war es möglich, die atmosphärischen Flüsse und die Dynamik des Austausches zwischen Wald und atmosphärischer Grenzschicht übergreifend zu beobachten. Durch die Verwendung von schnellen und mittleren Messtechniken konnten Austauschprozesse auf verschiedenen zeitlichen Skalen erfasst, analysiert und verglichen werden. Die technische Beschreibung aller im Rahmen des Experimentes durchgeführten Messungen ist in Thomas et al. (2004) dokumentiert. Die Vorbereitung des Experimentes beruht auf langjährigen Erfahrungen in der Messung turbulenter Flüsse über hoher Vegetation. Hinweise über Rampen- und kohärenten Strukturen und deren Bearbeitung wurden von Collineau and Brunet (1993a) und Collineau and Brunet (1993b) gegeben. Die methodischen Arbeiten wurden u. a. bei Untersuchungen zu stabilen Schichtungen in der Antarktis weitergeführt (Handorf und Foken 1997). Entsprechende eigene Untersuchungen in und über Wäldern wurden erstmals beim BEMA Experiment 1993 in Italien realisiert (Schween et al., 1997; Seufert, 1997). Damit werden bei der Flussbestimmung, z.B. Kohlenstoffflüsse im FLUXNET Programm (Baldocchi et al., 2001), nicht nur der Fluss oberhalb des Bestandes oder advective Terme (Aubinet et al., 2003; Lee, 1998) bestimmt, sondern auch Flussbeiträge, die aus der Turbulenzstruktur herrühren. Von wesentlicher Bedeutung ist auch die Separation von Assimilati-

ons- und Respirationsflüssen (Lloyd et al., 1996; Wichura et al., 2004). Die Anlage des WALDATEM-2003 Experimentes trägt allen diesen Gesichtspunkten Rechnung.

### **2.2.1 Mittlere meteorologische Messungen**

Während des gesamten Experimentes wurden Messungen durchgeführt, die den mittleren Verlauf wichtiger meteorologischer Parameter widerspiegeln. Dabei wurden neben Vertikalprofilen am Hauptturm (s. Abb. 1) auch ein Horizontalprofil aus weiteren zusätzlichen Türmen im Stammraum installiert, um Horizontaladvektion und katabatische Luftbewegungen erfassen zu können. Die abgeleiteten Informationen lieferten wichtige Beiträge zur Interpretation der atmosphärischen Flüsse und zur pflanzenphysiologischen Heterogenität des Unterwuchses, da parallel zu den Luftströmungen auch Horizontalgradienten der Kohlendioxidkonzentration gemessen wurden.

#### **Windprofil in und über dem Wald**

Der mittlere Verlauf der Horizontalwindgeschwindigkeit wurde mit einem Vertikalprofil aus 7 Schalensternanemometern (T. Friedrichs GmbH & Co., Windgeschwindigkeitsgeber Nr. 4034) gemessen, die in den Höhen 2 m, 10 m, 16 m, 18 m, 21 m, 25 m und 32 m am Hauptturm installiert waren. Im Bereich der Kronenoberkante wurde das mittlere Windprofil besonders hoch aufgelöst, um den entscheidenden Umkehrpunkt im Windprofil optimal auflösen zu können. Eine Windfahne auf der Messhöhe von 32 m lieferte die Anströmrichtung über dem Bestand und diente zur Kontrolle der korrekten horizontalen Ausrichtung der Ultraschallanemometer. Eine Teilauswertung der erhobenen Daten erfolgt im Berichtsteil des Teilprojektes A3.

#### **Temperatur- und Feuchteprofil in und über dem Wald**

Die Messungen am Hauptturm umfassten ein Vertikalprofil der Temperatur und der Feuchte, das an 5 Messhöhen auf 2.0 m, 5.5 m, 12.5 m, 21.0 m und 32.0 m parallel mit ventilierten Psychrometern (T. Friedrichs GmbH & Co., Psychrometer nach Frankenberger) und kapazitiven Feuchtemessungen (Vaisala GmbH, HMP45a) ausgestattet war. Diese Messungen dienten zur Erfassung des komplexen Stabilitätsregimes in und über dem Wald und ließen somit in Kombination mit den Flussmessungen und den Eigenschaften der kohärenten Strukturen Rückschlüsse auf Kopplung und Entkopplungszuständen zwischen Wald und Atmosphäre zu. Ergänzt wurden die Lufttemperaturmessungen durch Messungen der Bodentemperatur in einem Vertikalprofil von 0.05 m, 0.10 m, 0.20 m und 0.50 m Tiefe und durch Messungen des Bodenwärmestromes mit Hilfe von Bodenwärmestromplatten (RIMCO Instr., HP3). Eine Teilauswertung der erhobenen Daten erfolgt im Berichtsteil des Teilprojektes A3.

#### **Kohlendioxid**

Kohlendioxid ist ein wichtiger Indikator für physiologische Aktivität im Ökosystem. Neben den Kohlendioxidflussmessungen mittels der Ultraschallanemometer und der hochauflösenden Gasanalysatoren wurde ein weiteres Vertikalprofil zur kontinuierlichen Bestimmung und des Verlaufes der mittleren Kohlendioxidkonzentration in und über dem Wald betrieben. Dazu wurden am Hauptturm in den Höhen 0.03 m, 0.30 m, 0.90 m, 2.25 m, 5.25 m, 15.0 m, 21.6 m und 32.6 m Gasansaugleitungen installiert, die an einen zentralen Gasanalysator (Li-Cor Inc., Li-820) angeschlossen wurden. Diese Profilanlage wurde an der Abteilung Mikrometeorologie selbst entwickelt und diente weiterhin zur Bestimmung von mittleren Profilen des stabilen Isotops  $^{13}\text{C}$  im atmosphärischen Kohlendioxid. Anschliessend wurden die Proben in Glasflaschen gesammelt und im Isotopenlabor im Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena analysiert. Das Analysesystem 'Hydra' (National Center for Atmospheric Research NCAR, Boulder) wurde eingesetzt, um die horizontalen Gradienten und damit die Heterogenität der Kohlendioxidkonzentration zu ermitteln, aus denen u. a. Rückschlüsse auch auf horizontale Advektion von Kohlenstoff gezogen werden können. Hierbei wurden an den 3 zusätzlichen Masten in den Höhen 1.00 m und 2.25 m

Ansaugleitungen angebracht, und die Kohlendioxidkonzentration zentral über einen Analysator (Li-Cor Inc., Li-7000) bestimmt. Die Auswertung des Vertikalprofils wird in den Berichten der Teilprojekte A3 und A7 vorgestellt.

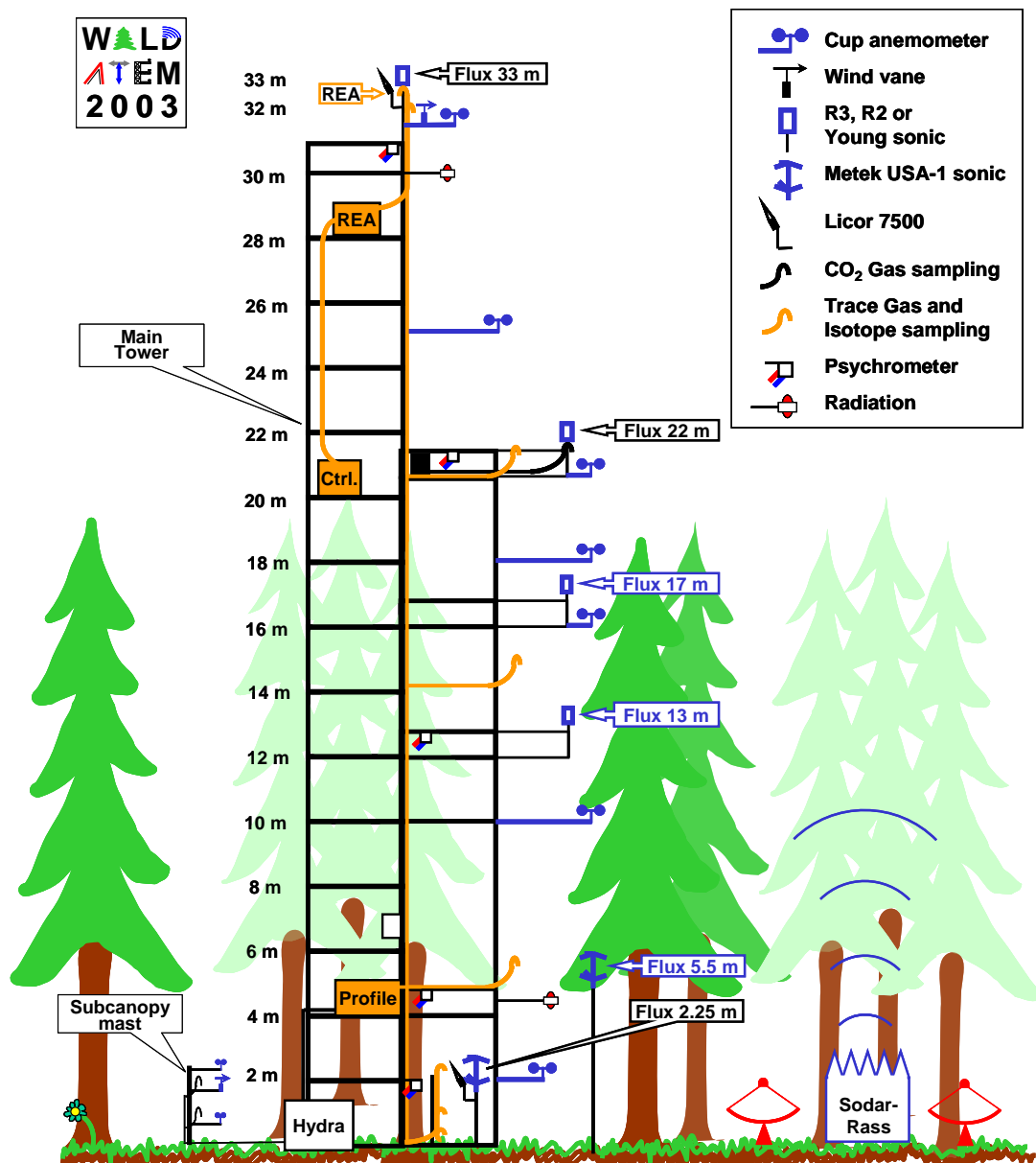


Abb. 1: Schematische Übersicht des experimentellen Aufbaus während der Intensivmesskampagne WALDATEM-2003.

## **Strahlung**

Die Strahlung ist ein zentraler Parameter zur Steuerung physiologischer Vorgänge im Ökosystem. Die kurzwelligen und langwelligen Komponenten der Strahlungsbilanz wurden im und über dem Wald mittels Pyradiometern und Pyrgeometern (Kipp & Zonen, CNR1; CM14 und CG2) bestimmt, die in den Höhen 4.6 m und 30.0 m am Hauptturm angebracht waren. Durch den Vergleich der beiden unabhängigen Strahlungsmessungen kann der Anteil des innerhalb des Bestandes zur Verfügung stehenden Lichts bestimmt und u.a. Rückschlüsse auf die Intensität assimilatorischer und dissimilatorischer Vorgänge gezogen werden.

## **Niederschlag und Sichtweite**

Der Niederschlag ist der zentrale Parameter für die Verfügbarkeit oberflächennahen Wassers und wirkt sich somit direkt auf Stoffumsätze im Ökosystem aus. Zur Bestimmung der Niederschlagssumme wurde ein Niederschlagssammler (Belfort Instr., OMC212) in ca. 200 m Entfernung vom Hauptturm verwendet. Zusätzlich dazu wurde auch ein Present-Weather-Detector (Vaisala GmbH, PWD 11) zur Bestimmung der Sichtweite eingesetzt, um dem häufigen Auftreten von Nebel am Standort Rechnung zu tragen.

## **Wind- und Temperaturprofil in der Grenzschicht**

Das mittlere Windprofil der Schalensternanemometer und das Vertikalprofil der Ultraschallanemometer am Hauptturm wurden in die atmosphärische Grenzschicht durch akustische Fernsondierung mit einem SODAR-RASS System (Metek GmbH, DSDPA90.64 mit 1290-MHz MERAS Erweiterung) fortgesetzt. Auf diese Weise wurden wertvolle Informationen sowohl über die mittleren Strömungsbedingungen, als auch den Turbulenzzustand der Atmosphäre bis in eine Höhe von ca. 1000 m über Grund gesammelt. Der Einsatz der RASS- Komponente erlaubte eine Erweiterung des mittleren Temperaturprofils des Hauptturms bis in eine Höhe von ca. 300 m über Grund. Durch die Kombination der vertikalen Wind- und Temperaturinformationen und unter Hinzunahme des Turbulenzzustandes konnte der Verlauf der Entwicklung der atmosphärischen Grenzschicht abgeleitet und lokale orographische Effekte der Strömung nachgewiesen werden. Die Auswertung dieser Messungen erfolgte im Rahmen der Diplomarbeit von J.-C. Mayer, die von diesem Projekt betreut wurde.

## **Advektion im Stammraum**

Die Erfassung von Prozessen horizontaler Advektion und katabatischen Strömungen im Stammraum wurde durch die Installation zusätzlicher kleiner Messtürme umgesetzt, die sowohl entlang, als auch quer zur Hangneigung angeordnet waren. Insgesamt wurden 3 Türme mit einer max. Messhöhe von 2.3 m bzw. 6 m installiert, die mit Schalensternanemometern (Climatronics Corp., F460) auf den Messniveaus von 1.0 m, 1.6 m und 2.2 m bzw. 1.0 m, 2.3 m und 6.0 m und einer Windfahne (Vector Instr., W200P; Climatronics Corp., F460) ausgestattet waren. Die zusätzlichen Türme wurden weiterhin mit Messeinlässen eines Horizontalprofils der mittleren Kohlendioxidkonzentration versehen, das bereits näher im Unterpunkt 'Kohlendioxid' erläutert wurde. Die Auswertung dieser Messungen erfolgte im Rahmen einer Diplomarbeit von J. Schröter betreut von Teilprojekt A7.

### **2.2.2 Atmosphärische Flussmessungen und kohärente Strukturen**

Zur Erfassung der Energie- und Stoffflüsse zwischen Wald und atmosphärischer Grenzschicht wurden hochauflösende Messsysteme in Kombination mit der Eddy-Kovarianz-Methode eingesetzt, die mit einer Probenahmefrequenz von 10 Hz bzw. 20 Hz betrieben wurden. Die aufgezeichneten hochaufgelösten Zeitreihen dienten ebenfalls als Datengrundlage zur Detektion und Analyse der kohärenten Strukturen (Kernteil Teilprojekt A6). Im Falle der Bestimmung von atmosphärischen Flüssen stabiler Isotope, für deren Konzentrationsmessungen keine geeigneten

hochfrequenten Messverfahren existieren, wurde auf die Relaxed-Eddy-Accumulation (REA) zurückgegriffen (Kernteil Teilprojekt A7).

### **Turbulente Flüsse**

Ein Vertikalprofil bestehend aus 6 Ultraschallanemometern (Gill Instruments Ltd., R3-50, R2; R.M. Young Comp., 81000; Metek GmbH, USA-1-FHN, USA-1-A) und 3 Gasanalysatoren (Li-Cor Inc., Li-7500, Li-6262) wurde zur kontinuierlichen Erfassung der hochaufgelösten Zeitreihen des 3-dimensionalen Windvektors, der virtuellen (akustischen) Temperatur, der Kohlendioxidkonzentration und des Wasserdampfgehaltes am Hauptturm eingesetzt. Das Profil erstreckte sich vom Stamm- und Kronenraum des Fichtenbestandes bis in die raue Unterschicht. Die genauen Messhöhen der Ultraschallanemometer betrugen 2.3 m, 5.5 m, 13.6 m, 17.7 m, 22.4 m und 33.1 m, die der hochauflösenden Gasanalysatoren 2.3 m, 22.4 m und 33.1 m. Die individuellen Zeitreihen wurden in 30 Minuten Intervalle unterteilt. Das Vertikalprofil diente zur Bestimmung des turbulenten Impulsflusses, der fühlbaren und latenten Wärmeströme und des Kohlendioxidflusses nach der Eddy-Kovarianz-Methode. Die Qualitätssicherung zur Bestimmung der turbulenten Flüsse wurde gemäß Foken et al. (2004) durchgeführt.

### **Kohärente Strukturen**

Die mit dem Vertikalprofil aus Ultraschallanemometern und schnellen Gasanalysatoren aufgezeichneten Zeitreihen dienten auch als Grundlage zur Detektion und Analyse der kohärenten Strukturen. Die Detektion der kohärenten Strukturen in den erfassten Zeitreihen erfolgte mit der Software WALDSCHRAT (siehe Punkt 7.3) quasi in Echtzeit, d.h. direkt nach Abschluss eines Messintervalls sowohl für die vektoriellen, als auch die skalaren Größen im Feld. Dadurch war es möglich, die stark variablen Austauschprozesse zwischen Wald und Atmosphäre durch kohärente Strukturen direkt im Feld zu verfolgen und nachzuvollziehen. Aufgrund bergrenzter Rechenkapazität konnte diese quasi-Echtzeit Auswertung nur für die oberste Messhöhe durchgeführt werden, alle weiteren Zeitreihen wurden in einer Nachbearbeitung nach Abschluss der Messungen analysiert. Zusätzlich zu dem Vertikalprofil am Hauptturm wurde zeitweise auch das fernerkundliche akustische Sondierungssystem SODAR-RASS zur Erfassung der kohärenten Strukturen in der Luftschicht über dem Wald bis in eine Höhe von 150 m und darüber hinaus bis in eine Messhöhe von 155 m über Grund eingesetzt. Der Einsatz eines speziellen Sondierungsprogrammes mit einer akustischen Schallfrequenz von 2000 Hz erlaubte die Messung von Zeitreihen des Vertikalwindes und der virtuellen Temperatur mit einer Auflösung von 0.4 Hz bei einer vertikalen Auflösung von 10 m. Die Ergebnisse dieser Analysen werden in diesem Bericht unter Punkt 8 vorgestellt.

### **Isotopenflüsse**

Die Messung von  $^{13}\text{C}$  Isotopen kann zusätzliche Informationen über die Quellen und Senken des Kohlendioxids und der Austauschprozesse mit der Atmosphäre liefern. Im Rahmen des WALDATEM-2003 Experimentes wurden die  $^{13}\text{C}$ -Flüsse mit Hilfe der Relaxed-Eddy-Accumulation (REA) Methode gemessen (Businger und Oncley, 1990). Die REA Technik ist ein indirektes Verfahren zur Flussbestimmung von skalaren Größen, deren Konzentrationsfluktuationen nicht ausreichend schnell gemessen werden können, um die Voraussetzungen der Eddy-Kovarianz-Methode zu erfüllen. Das selbstentwickelte Messsystem wurde oberhalb des Fichtenbestandes parallel zu den schnellen Wind- und Kohlendioxidkonzentrationsmessungen des obersten Messniveaus des Vertikalprofils auf 33.1 m Höhe betrieben. Es handelt sich dabei um ein 'Whole air'-REA-System, in dem die gesammelten Luftproben in einem Zwischenreservoir aufgehoben und anschließend in Glasflaschen abgefüllt wurden. Anschließend wurden sie mit hoher Präzision im Isotopenlabor des Max-Planck-Institutes für Biogeochemie in Jena analysiert. Die Ergebnisse dieser Messungen werden im Bericht des Teilprojektes A7 vorgestellt.

## 2.3 Analysesoftware WALDSCHRAT

Der Name der entwickelten Analysesoftware steht für die englische Abkürzung WAVElet Detection Software for CoHERent RAMP patterns. Sie bietet die Möglichkeit der umfassenden Auswertung von kohärenten Strukturen in turbulenten Zeitreihen hinsichtlich singulärer Ereignisse, statistischer Eigenschaften aller Ereignisse innerhalb einer Zeitreihe und der Abschätzung des kohärenten Flussanteils zur Verbesserung der Kohlenstoff- und Verdunstungsbilanz eines Waldökosystems. Die Analyse basiert auf der Wavelet-Analyse, deren mathematische Grundlagen ab Anfang der 80er Jahre gelegt wurden (Grossmann et al., 1989; Marr and Hildreth, 1980). Die Wavelet-Analyse ist ein komplexes und mathematisch aufwendiges Verfahren, das eine Auswertung der Zeitreihen sowohl im Frequenz-, als auch Zeitraum erlaubt. Der Vorteil gegenüber der klassischen globalen Fast-Fourier-Transformation ist die lokale Eigenschaft, die eine exakte zeitliche Lokalisierung der kohärenten Strukturen zulässt. Die Wahl einer optimalen Wavelet-Funktion aus einer Vielzahl verfügbarer ist dabei entscheidend für seine Leistungsfähigkeit. Die im Anschluss vorgestellte Analysenmethode wird im Einzelnen für jede Zeitreihe des Horizontalwindes, der Windrichtung, des Vertikalwindes, der Temperatur und der CO<sub>2</sub>- und Wasserdampfkonzentration gerechnet. Die Hauptschritte der Auswertung umfassen (i) die Datenvorbereitung mitsamt einer geeigneten Tiefpassfilterung, (ii) Berechnung von Spektren der Waveletvarianz zur Bestimmung charakteristischer Ereignisdauern, (iii) Detektion einzelner kohärenter Strukturen und deren statistischer Eigenschaften und (iv) Abschätzung des Flussanteils. Eine detaillierte Beschreibung der Schritte (i) bis (iii) ist in Thomas and Foken (2004a) zu finden, soll jedoch im Folgenden stichwortartig dargestellt werden. Der abschließende Schritt (iv) wird im Folgenden detailliert erläutert, da er eine zentrale Rolle in der Beantwortung der Hypothesen des Projektes einnimmt.

Zu (i): Bei der Vorbereitung der Daten zur Analyse werden die aufgezeichneten turbulenten Rohdaten gemäß der mittleren Anstromlinien in ein neues Koordinatensystem rotiert (Planar-Fit Rotation (Wilczak et al., 2001)), Ausreisser in den Zeitreihen entfernt (Vickers and Mahrt, 1997), die originale Probenahmefrequenz von 20 Hz durch Blockmittelung auf 2 Hz reduziert, die Zeitreihe normalisiert und durch die Ergänzung von Nullen künstlich verlängert (Heinz et al., 1999). Die Blockmittelung ermöglicht eine erheblich schnellere Berechnung der anschließenden kontinuierlichen Wavelet-Transformation durch Reduktion der Datenpunkte ohne einen signifikanten negativen Einfluss auf die Genauigkeit der Ergebnisse zu haben. Die künstliche Verlängerung der Zeitreihe durch Nullen verhindert Randeffekte und lässt eine Analyse mit größeren Ereignisdauern zu, ohne die statistischen Eigenschaften zu verändern. Anschließend wird der hochfrequente turbulente Anteil der Zeitreihen mit einem Wavelet-Tiefpassfilter entfernt, der ein biorthogonales BIOR5.5 Wavelet (Kumar and Foufoula-Georgiou, 1994) benutzt.

Zu (ii): Nach der Datenvorbereitung wird eine kontinuierliche Wavelet-Transformation der Zeitreihe mit Hilfe des Morlet-Wavelets verwendet, um das Spektrum der Waveletvarianz zu berechnen. Das komplexe Morlet-Wavelet ist für diesen Zweck optimal geeignet, da es besonders gut im Frequenzraum lokalisiert ist. Die in dem berechneten Spektrum vorhandenen Maxima liefern die zentrale Aussage über charakteristische Ereignisdauern für in der Zeitreihe enthaltenen kohärenten Strukturen.

Zu (iii): Die anschließende Detektion einzelner Strukturen basiert ebenfalls auf einer Wavelet-Transformation der Zeitreihe unter Verwendung der bereits bestimmten charakteristischer Ereignisdauer aus Punkt (ii). Hierzu wird das Mexican-Hat-Wavelet verwendet, das eine gute Lokalisierung sowohl in der Frequenz-, als auch Zeitdomäne bietet. Auf Grundlage der detektierten einzelnen kohärenten Strukturen werden deren statistische Eigenschaften wie Anzahl, mittlerer räumlicher und zeitlicher Abstand und die Variabilität des Auftretens berechnet.

Zu (iv): Die abschließende Berechnung des Flussanteils basiert auf der Methode der bedingten Probenahme, des "conditional sampling". Diese Methode beruht auf der Zerlegung einer hochfrequent gemessenen Variable X in drei Bestandteile (Antonia et al., 1987; Bergström and Högström, 1989),

$$X = \overline{X} + x_{cs} + x_t, \quad (1)$$

wobei  $\overline{X}$  den mittleren langfristigen Anteil repräsentiert, der sich unter stationären Bedingungen nicht verändert.  $x_{cs}$  ist der niederfrequente fluktuierende Anteil, d.h. die Veränderung der Variablen durch kohärente Strukturen, und  $x_t$  die hochfrequente Fluktuation, die sich aus der wohlbekannten Turbulenz ableitet. Beprobt man nun eine Zeitreihe zu den aus Schritt (iii) detektierten Auftrittszeitpunkten einzelner kohärenter Strukturen mit der charakteristischen Länge aus Schritt (ii) und definiert einen Mittelungsoperator  $\langle \rangle$  über all diese Teilproben, erhält man über diese Methode der bedingten Probenahme das bedingte Mittel (conditional average). Nach der Reynoldszerlegung einer Variablen  $X = \overline{X} + x'$  ergibt sich für den fluktuierenden Anteil  $x'$  und Gl. (1)

$$x' = x_{cs} + x_t. \quad (2)$$

Für das bedingte Mittel ergibt sich daraus

$$\langle x' \rangle = \langle x_{cs} \rangle \quad (3)$$

unter der Annahme, dass die hochfrequenten Anteile keine Korrelation mit den niederfrequenten Anteilen aufweisen und somit  $\langle x_t \rangle = 0$  gilt. Für das Produkt zweier Variablen  $X$  und  $Y$  gilt resultierend aus Gl. (2) und Gl. (3) (Collineau and Brunet, 1993b)

$$\underbrace{\langle x'y' \rangle}_A = \underbrace{\langle x_{cs}' \rangle \langle y_{cs}' \rangle}_B + \underbrace{\langle x_t y_t \rangle}_C. \quad (4)$$

Definiert man nun einen Mittelungsoperator über die charakteristische Länge der kohärenten Struktur, d.h. über die Fensterlänge des bedingten Mittels in Gl. (4), ergibt sich der Gesamtfluss (A) als Summe des Flussbeitrages der kohärenten Strukturen (B) und der wohlbekannten Turbulenz (C). Eine Voraussetzung der Anwendbarkeit dieser Flussbestimmungsmethode besteht in der Forderung, dass der Gesamtfluss (A) des bedingten Mittels dem Reynolds gemitteltem Fluss nach der Eddy-Kovarianz-Methode  $\overline{x'y'}$  entspricht, i.e. es muss gelten  $\langle x'y' \rangle \approx \overline{x'y'}$ .

Der Flussbeitrag der kohärenten Strukturen (B) lässt sich weiterhin unterteilen, und zwar in den Anteil der langsamen abwärtsgerichteten Bewegung (ejection, ej), und den der schnellen abwärtsgerichteten Bewegung (sweep, sw). Das Verhältnis  $\frac{\langle x_{cs}' \rangle \langle y_{cs}' \rangle_{sw}}{\langle x_{cs}' \rangle \langle y_{cs}' \rangle_{ej}}$  (im

Folgenden kurz als  $sw/ej$  bezeichnet) bietet die Möglichkeit, die ablaufenden Austauschprozesse zwischen Atmosphäre und innerhalb des Bestandes näher zu charakterisieren, da vor allem die kräftigen sweeps innerhalb des Bestandes einen Austausch bewirken. Die Methode der bedingten Probenahme stellt somit eine Möglichkeit der spektral lokalen Flussbestimmung kohärenter Strukturen dar und erlaubt dadurch eine Abschätzung ihres Anteils an der gesamten Stoff- und Energiebilanz des Ökosystems.



### 3. Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse zu den in Kapitel 6 aufgeführten Fragestellungen dargestellt. Die Ausprägung der Eigenschaften kohärenter Strukturen verschiedener Skalare (skalare Ähnlichkeit) und ihre Auswirkungen auf die REA Methode werden im Bericht des Teilprojektes A7 erläutert.

#### 3.1 Dynamische Eigenschaften kohärenter Strukturen in und über dem Wald

Die zeitliche und räumliche Dynamik der kohärenten Strukturen wurde nach der Verwirbelungsschichtanalogie (Raupach et al., 1989; Raupach et al., 1996) ausgewertet. Diese Theorie beschreibt die Luftströmung in und über dem Wald in Analogie zu einer Überströmung zweier Fluide mit unterschiedlicher Geschwindigkeit unter Laborbedingungen. Experimentelle Untersuchungen (Brunet and Irvine, 2000; Raupach et al., 1996; Thomas and Foken, 2004b; Wichura et al., 2001) haben gezeigt, dass diese Theorie über hoher Vegetation und einen weiten Stabilitätsbereich anwendbar ist. Die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Analysen erweitern dabei den Umfang bisheriger Studien von Brunet and Irvine (2000), Raupach et al. (1996), Wichura et al. (2004) in zwei wesentlichen Punkten: (i) die Anzahl der untersuchten Datensätze und damit die zeitliche und räumliche Repräsentanz der Messungen über einen Zeitraum von mehreren Monaten, und (ii) die statistische Auswertung an einem komplexen Standort in einem orographisch stark gegliedertem Gelände.

Kohärente Strukturen werden als Folge der starken Windscherung an der Waldoberkante erklärt und haben demnach einen rein dynamischen Ursprung. Der mittlere Abstand aufeinander folgender kohärenter Strukturen  $\Lambda_x$  der untersuchten Variable  $x$  lässt sich als lineare Funktion der Windscherungsskala  $L_s$  mit der Steigung  $m$  ausdrücken (siehe Gl. ( 5 )). Experimentelle Ergebnisse lieferten einen Wertebereich von 8 bis 10 für mäßig dichte Waldbestände mit einem mittleren PAI (Plant Area Index) Wert von 2.1 bis 4.1.

$$\Lambda_x \cdot h_c^{-1} = m \cdot L_s \cdot h_c^{-1} \quad (5)$$

$\Lambda_x$  wird nach Gl. ( 6 ) aus den Ergebnissen der Detektion der individuellen kohärenten Strukturen mittels der Waveletanalysen bestimmt,

$$\Lambda_x = \overline{T_x} \cdot 1.8 \cdot \overline{U_{h_c}} \quad (6)$$

wobei  $\overline{T_x}$  der mittlere zeitliche Abstand aufeinander folgender kohärenter Strukturen und  $\overline{U_{h_c}}$  die mittlere Horizontalwindgeschwindigkeit in Bestandeshöhe ist. Abb. 2 stellt die Berechnung von  $\Lambda_x$  anhand der Zeitreihe des Vertikalwindes für ein 30 min Intervall dar. Aus der mithilfe der kontinuierlichen Wavelettransformation (Morlet-Wavelet) berechneten Waveletkoeffizienten (Abb. 2a) wird das Waveletvarianzspektrum (Abb. 2b) bestimmt. Dieses zeigt ein erstes Maximum  $D_e$  bei 21.1 s Ereignisdauer. Diese Ereignisdauer repräsentiert die mittlere Andauer der kohärenten Strukturen Im Vertikalwind in diesem 30 min Intervall. Die nachfolgende Detektion der individuellen kohärenten Strukturen geschieht nun in der Originalzeitreihe mithilfe einer weiteren Wavelettransformation (Mexican Hat-Wavelet) unter Verwendung der zuvor ermittelten Ereignisdauer  $D_e$  (Abb. 2c). Der mittlere zeitliche Abstand der kohärenten Strukturen  $\overline{T_x}$  wird nun anhand aller detektierten individuellen kohärenten Strukturen berechnet. Diese Windscherungsskala  $L_s$  wurde unabhängig aus dem mittleren vertikalen Profil der Schalensternanemometer bestimmt und ist definiert durch

$$L_s = \frac{\overline{U_{h_c}}}{(dU/dz)_{z=h_c}} \quad (7)$$

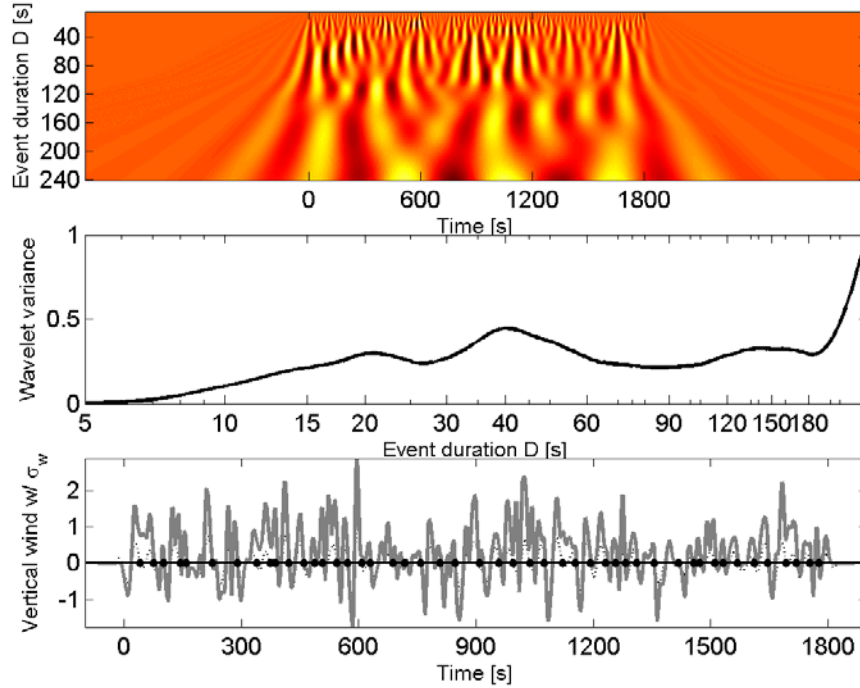


Abb. 2: Schematische Darstellung der Berechnung des mittleren zeitlichen Abstandes aufeinanderfolgender kohärenter Strukturen  $\Lambda_x$  im Vertikalwind aus den Waveletanalysen: (a) oben, Berechnung der Waveletkoeffizienten; (b) Mitte, Spektrum der Waveletvarianz und Ermittlung der charakteristischen Ereignisdauer  $D_e = 21.1$  s; (c) unten, Detektion der einzelnen kohärenten Strukturen in der normalisierten Zeitreihe (Punkte) und Berechnung deren mittlerer Abstand  $\overline{T_x}$ .

wobei  $(dU/dz)_{z=h_c}$  der Gradient der Horizontalwindgeschwindigkeit in Bestandeshöhe ist. Um die Aussagen zu generalisieren, werden beide Variablen  $\Lambda_x$  und  $L_s$  mit der mittleren Bestandeshöhe normalisiert (siehe Gl. ( 5 )). Abweichend von der originalen Verwirbelungsschichtanalogie wurde die lineare Funktion (Gl. ( 5 )) nicht durch den Ursprung des Koordinatensystems ( $\Lambda_x=0$ ,  $L_s=0$ ) gezwungen, d.h. ein absolutes Glied  $b \cdot h_c^{-1} \neq 0$  wird zugelassen. Diese Abweichung wirkt sich jedoch nur marginal auf die berechneten Steigungen  $m$  aus.

Definiert man die Bestandeshöhe in aerodynamischer Hinsicht als Höhe über Grund, in der das mittlere vertikale Profil des Horizontalwindes seinen charakteristischen Umkehrpunkt aufweist, ergibt sich für den Standort Weidenbrunnen eine deutliche Abhängigkeit der Bestandeshöhe  $h_c$  von der Anströmungsrichtung (Abb. 3). Diese Beobachtung lässt sich durch die topographischen Einflüsse der näheren Umgebung erklären. Der Weidenbrunnen wird von West her aus dem Tal und von Nord über den nahegelegenen Bergkopf angeströmt. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Dynamik der kohärenten Strukturen für alle Windrichtungssektoren zu gewährleisten, wird im Folgenden  $h_c$  als Funktion der Windrichtung definiert (schwarze Linie in Abb. 3). Der Betrag der aerodynamischen Bestandeshöhe variiert zwischen 18.5 m und 20.3 m über Grund und entspricht im Mittel der visuell beobachteten Bestandeshöhe von 19 m. Aus Abb. 3

wird ebenfalls deutlich, dass sich die Anströmungsrichtung in drei Hauptsektoren einteilen lässt, nämlich einen Nordsektor zwischen 310° und 60°, einen Südostsektor zwischen 60° und 190° und einen Westsektor zwischen 190° und 310°. Im Folgenden werden die Ergebnisse in Abhängigkeit dieser drei Windsektoren dargestellt, da sie unterschiedliche topographische und aerodynamische Bedingungen im Luv des Weidenbrunnen repräsentieren.

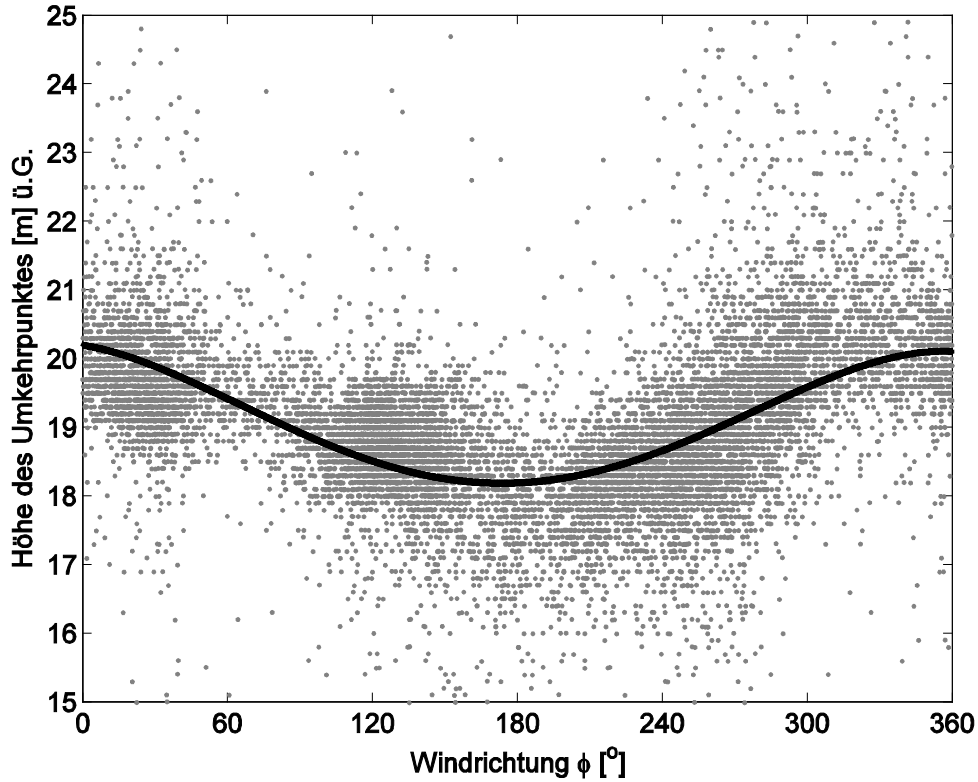


Abb. 3: Höhe des Umkehrpunktes über Grund im mittleren Profil des Horizontalwindes der Schalensternanemometer abgeleitet aus 10 min Mittelwerten (Punkte) und berechneter Mittelwert (schwarze Linie) als Funktion der Windrichtung für den Zeitraum des WALDATEM-2003 Experimentes.

Die berechneten Ergebnisse wurde einer strikten Qualitätskontrolle unterworfen, die Ergebnisse der Analyse der 30 min Intervalle aussortierte und verwarf (a) die während Regen gemessen wurden, (b) mit  $\overline{U_{h_c}} > 2.5 \text{ ms}^{-1}$  (Sturmsituationen) oder  $\overline{U_{h_c}} < 0.3 \text{ ms}^{-1}$  (Kalme), (c) mit  $(dU/dz)_{z=h_c} < 0$  (extrem gestörte Profile), (d) die Anzahl detektierter kohärenter Strukturen  $N$  der Variable  $x$  in einem Intervall  $k$  mehr als doppelt so groß oder weniger als die Hälfte des vorherigen Intervalls betrug, also wenn  $N_k(x) > 2 \cdot N_{k-1}(x)$  oder  $N_k(x) < \frac{1}{2} \cdot N_{k-1}(x)$  (fehlerhafte Detektion durch die Waveletanalyse) oder (e) die atmosphärische Stabilität  $\zeta = \frac{z-d}{L} > 1$  oder  $\zeta < -1$  betrug, wobei  $L$  die Obukhov-Länge und  $d = 2/3 h_c$  sind.

Abb. 4 zeigt die Ergebnisse von  $\Lambda_w$  für den Vertikalwind gemessen mit dem Ultraschallanemometer in 33.1 m Höhe als Funktion von  $L_s$ . Deutlich sind die Unterschiede zwischen den drei Windrichtungssektoren zu erkennen. Der durch alle drei Sektoren aufgespannte Wertebereich von  $L_s$  erstreckt sich von 0.12 bis 0.6. Dieses Ergebnis ist in Übereinstimmung mit Brunet and Irvine (2000), die Werte im nahe neutralen Bereich zwischen 0.3 und 0.5 fanden. Der Nordsektor

weist die größte Streuung mit einem Korrelationskoeffizienten  $R$  von 0.33 auf und entspricht mit einem Wert  $m$  von 7.5 der unteren Grenze der Resultate vorheriger experimenteller Studien von 8 bis 10. Die in diesem Sektor ermittelten Windscherungsskalen  $L_s$  liegen in einem Bereich von 0.18 bis 0.54. Der Westsektor ist durch ein  $R$  von 0.43 und einem  $m$  von 10.1 charakterisiert. Damit entspricht er der oberen Grenze der Resultate vorheriger Studien. Der in diesem Sektor aufgespannte Wertebereich von  $L_s$  entspricht dem Gesamtwertebereich aller Sektoren. Der Südostsektor hat den höchsten Korrelationskoeffizienten von 0.51 und liegt mit einem  $m$  von 17.2 weit außerhalb der bislang ermittelten Resultate anderer Studien. Eine mögliche Erklärung ist im Einfluss der Orographie zu

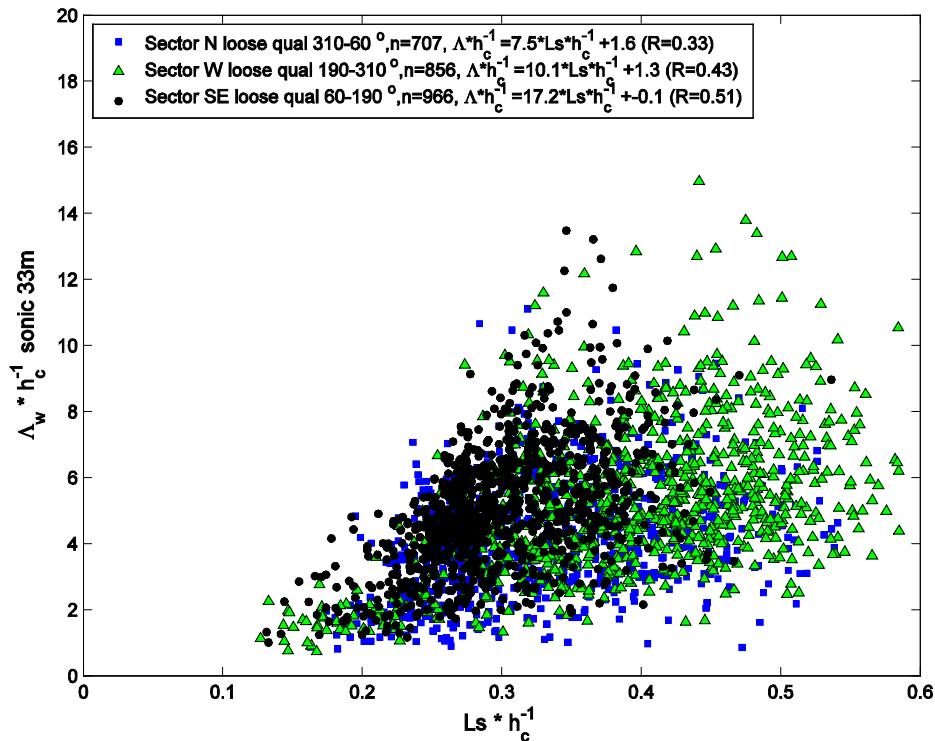


Abb. 4: Aus den Waveletanalysen ermittelter dimensionsloser Abstand  $\Lambda_w$  aufeinander folgender kohärenter Strukturen als Funktion der Windscherungsskala  $L_s$  für den Vertikalwind in 33.1 m während WALDATEM-2003 getrennt für die drei Hauptanströmsektoren einschließlich der berechneten linearen Funktionen der Korrelationsanalyse.

finden: Bei Anströmung aus dem Nordsektor wird die Strömung im Lee des Bergkopfes dazu gezwungen, sich dynamisch neu zu formieren. Die Folge davon ist, dass die im Luv befindliche Oberflächenstruktur keinen Einfluss mehr auf die Leeströmung ausüben kann. Die Neuformation der turbulenten Strömung und damit die Organisation der kohärenten Strukturen erfolgt gemäß den Bedingungen der Windscherungsskala, folglich ist in diesem Sektor eine gute Übereinstimmung mit den Literaturwerten zu erwarten. Die gefundenen Ergebnisse bestätigen diese Hypothese. Im Gegensatz dazu prägt die sich im Luv der beiden anderen Sektoren befindliche Oberfläche die Strömung durch Hindernisse und charakteristische Strukturen, dass diese einen Einfluss auf die Organisation der Strömung und damit auf die der kohärenten Strukturen gewinnen. Folglich ist bei Anströmung aus dem Südost- und Westsektor eine Abweichung von der Theorie der Verwirbelungsschichtanalogie zu erwarten, die die Organisation der kohärenten Strukturen nur als Abhängigkeit von  $L_s$  definiert.

Die Differenzen zwischen den drei unterschiedlichen Sektoren werden unterstrichen durch die Darstellung der ermittelten  $m$ -Werte für das vertikale Profil der Ultraschallanemometer und Gas-

analysatoren (Abb. 5, Abb. 6). Tab. 1 fasst die Ergebnisse der Auswertungen über die Dynamik der kohärenten Strukturen nach der Verwirbelungsschichtanalogie zusammen. Daraus wird deutlich, dass die unterste Messhöhe auf 5.5 m deutlich von denen der anderen vier Messhöhen abweicht. Der Grund dafür ist die begrenzte Datenverfügbarkeit, die auf wenige Wochen eingeschränkt war. Im Gegensatz dazu spiegeln die Messhöhen 33.1 m, 22.4 m, 17.7 m und 13.6 m einen Zeitraum von 2,5 Monaten wider. Folglich wurde die unterste Messhöhe für die weiteren Betrachtungen ausgeschlossen.

Die in Abb. 5 ersichtlichen Profile der m-Werte des Vertikalwindes, des Horizontalwindes und der Windrichtung spiegeln in allen drei Sektoren jeweils parallele Verläufe jedoch mit unterschiedlichen Werten wider: Für den Nordsektor lässt sich eine gute Übereinstimmung von  $m$  zwischen 7.8 und 12 über dem Waldbestand finden. Innerhalb des Bestandes reduziert es sich jedoch auf kleinere Werte zwischen 4 und 8. Dies bedeutet, dass der mittlere Abstand kohärenter Strukturen und auch ihre Größe im Verhältnis zur Scherungsskala deutlich kleiner wird. Das Verhältnis  $m_{vh}/m_w$  ist relativ konstant über das gesamte Profil und beträgt im Mittel 1.5.

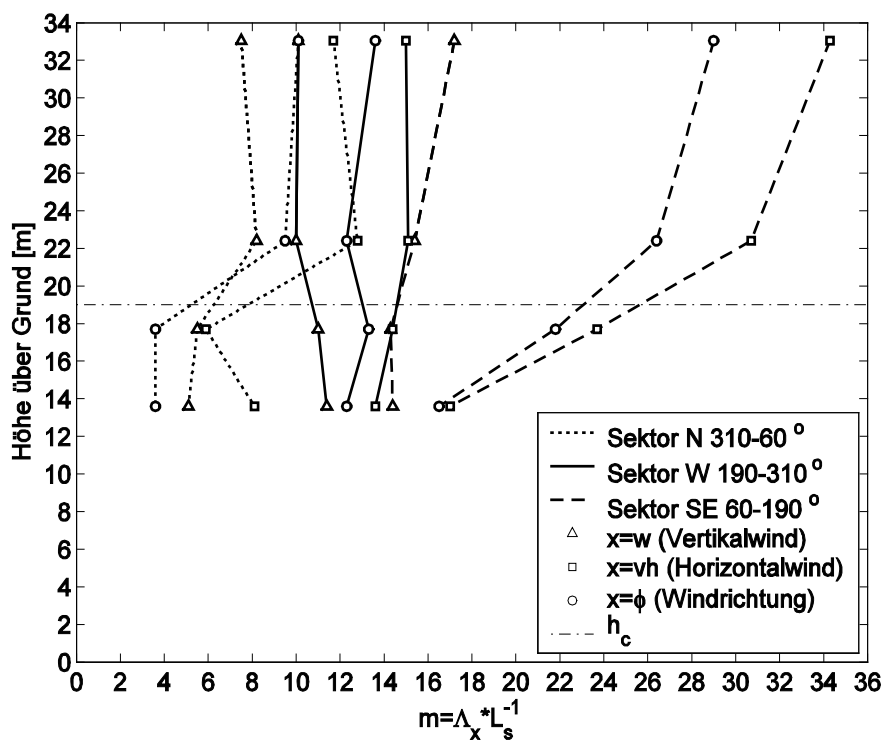


Abb. 5: Profil der ermittelten m-Werte als Quotient aus mittlerem Abstand aufeinander folgender kohärenter Strukturen  $\Lambda_x$  und der Windscherungsskala  $L_s$  der vektoriellen Komponenten für das Vertikalprofil der Ultraschallanemometer und Gasanalysatoren für den Zeitraum des WALDATEM-2003 Experimentes.

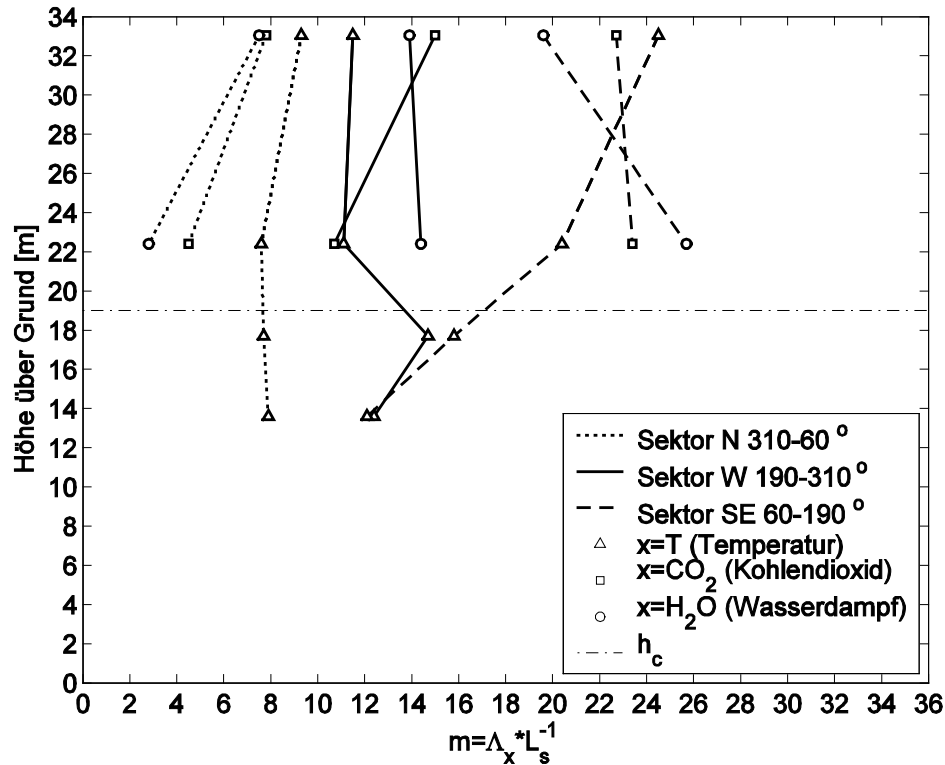


Abb. 6: Profil der ermittelten  $m$ -Werte als Quotient aus mittlerem Abstand aufeinanderfolgender kohärenter Strukturen  $\Lambda_x$  und der Windscherungsskala  $L_s$  der Skalare für das Vertikalprofil der Ultraschallanemometer und Gasanalysatoren für den Zeitraum des WALDATEM-2003 Experimentes.

Das Verhältnis  $m_\phi/m_w$  jedoch weist es eine deutliche Abhängigkeit von der Messhöhe auf und beträgt über dem Bestand 1.3 und innerhalb des Bestandes 0.7. Im Gegensatz dazu weist der Westsektor ein sehr homogenes Bild über das gesamte Profil auf. Für den Vertikalwind, Horizontalwind und die Windrichtung konnten im Mittel entsprechende  $m$  Werte von 10.7, 14.5 und 12.9 ermittelt werden. Die Verhältnisse  $m_{vh}/m_w$  und  $m_\phi/m_w$  betragen konstant 1.4 und 1.2. Die  $m$ -Werte im Südostsektor weisen große Differenzen zwischen dem Vertikalwind, dem Horizontalwind und der Windrichtung auf, wobei der generelle Verlauf der Profile ähnlich ist. Die  $m$ -Werte steigen mit zunehmender Höhe an, wobei der stärkste Gradient jeweils nahe der Bestandesoberkante in 18.5 m zu finden ist.  $m_{vh}/m_w$  steigt mit 1.1 in 13 m Höhe auf 2.0 in 33 m deutlich an. Einen ähnlichen Verlauf zeigt  $m_\phi/m_w$  mit 1.2 in 13 m und 1.7 in 33 m Höhe. (Brunet and Irvine, 2000) ermittelten ein mittleres Verhältnis  $m_{vh}/m_w$  von 3.1. Die in WALDATEM-2003 untersuchten kohärenten Strukturen aller Messhöhen und Anströmungsrichtungen weisen somit eine geringere Anisotropie zwischen horizontaler und vertikaler Ausdehnung auf, da durchweg Verhältnisse  $m_{vh}/m_w \leq 2$  gefunden wurden. Die in Abb. 6 dargestellten Profile der skalaren Größen weisen ebenso ein deutliches sektorenspezifisches Verhalten auf, wobei der Wert innerhalb eines Sektors nahezu konstant ist. Für die kohärenten Strukturen in den Zeitreihen der Temperatur ergeben sich somit für den Nordsektor  $m$ -Werte zwischen 3 und 7.8 und für den Westsektor zwischen 10.7 und 14.7. Im Nordsektor zeigt das Verhältnis  $m_T/m_w$  einen leicht zunehmenden Trend von 1.2 in 33.1 m auf 1.6 in 13 m Höhe, im Gegensatz zum Westsektor der ein konstantes Verhältnis von 1.1 auf allen Messhöhen aufweist. Der Südostsektor zeigt für die Temperatur wie auch in den vektoriellen Komponenten (Abb. 5) deutlich zunehmende  $m$ -Werte mit ansteigender Höhe, die in 33.1 m Höhe 24.5 betragen. Das Verhältnis  $m_T/m_w$  steigt mit zunehmen-

der Messhöhe an, und zwar von 0.8 in 13.6 m auf 1.4 in 33.1 m Höhe. Das von Brunet and Irvine (2000) beobachtete Verhältnis  $m_T/m_w$  von 1.7 zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen dieser Studie. Da nur die oberen beiden Messhöhen auf 33.1 m und 22.4 m mit Gasanalysatoren ausgestattet waren, erlaubten die Profile der m-Werte für das Kohlendioxid und den Wasserdampf einen nur begrenzten Vergleich mit den anderen Variablen. Das Kohlendioxid und der Wasserdampf zeigen im Nordsektor abnehmende m-Werte mit abnehmender Messhöhe, die zwischen 7.8 und 2.8 liegen. Die Verhältnisse  $m_{H_2O}/m_w$  zeigen einen deutlich abnehmenden Trend mit abnehmender Messhöhe von entsprechend 1.0 auf 0.6 bzw. 1.0 auf 0.3. Die m-Werte in den übrigen Sektoren hingegen zeigen keinen eindeutigen Trend mit der Höhe und liegen zwischen 10.7 und 15.0 im Westsektor und zwischen 19.6 und 25.7 im Südostsektor. Das Verhältnis von  $m_{CO_2}/m_w$  zeigt im West- und Südostsektor ein unterschiedliches Verhalten: Während es sich im Westsektor mit abnehmender Messhöhe von 1.5 auf 1.1 reduziert, bleibt es im Südostsektor mit 1.4 konstant. Das Verhältnis  $m_{H_2O}/m_w$  hingegen folgt im Westsektor keinem Trend mit abnehmender Messhöhe und ist konstant mit 1.4. Im Südostsektor hingegen steigt es mit abnehmender Höhe von 1.1 auf 1.7 an. Zu den Messungen des Wasserdampfes auf der Messhöhe 23.4 m ist anzumerken, dass es durch den verwendeten closed-path Analysator des Typs Li-6262 zu einer künstlichen Verlängerung der kohärenten Strukturen kommen kann. Die deutliche Abgrenzung aufeinander folgender kohärenter Strukturen kann durch Adsorptionsprozesse im Ansaugschlauch des Li-6262 verschwinden, was zu deutlich größeren kohärenten Strukturen und einem Anwachsen des Verhältnisses  $m_{H_2O}/m_w$  führt. Generell lässt sich aus den Resultaten der m-Werte der Skalare der Schluss ziehen, dass diese eine gute Übereinstimmung untereinander in den verschiedenen Hauptsektoren der Anströmung aufweisen. Die generelle Beobachtung kleinerer m-Werte und damit kleinerer kohärenter Strukturen im Bestand im Vergleich zu über dem Bestand lässt sich dadurch erklären, dass die Schicht der Baumkrone die Hauptumsatzfläche der Skalare darstellt. In Quellnähe kommen demnach kleinere kohärente Strukturen vor, die sich mit zunehmender Entfernung von der Umsatzfläche zu größeren vereinen und durch den dynamischen Transport mit dem Wind in ihren räumlichen Dimensionen verändert werden.

Die Ergebnisse unterstreichen die zuvor geäußerten Einflüsse der Topographie. Im Nordsektor finden sich kohärente Strukturen, deren Charakteristika eine sehr gute Übereinstimmung mit der Verwirbelungsschichtanalogie aufweisen. Innerhalb des Bestandes ist die Größe der kohärenten Strukturen deutlich reduziert, gleichzeitig jedoch steigt die Anzahl beobachteter kohärenter Strukturen an. Dies kann durch eine starke Deformation der kohärenten Strukturen durch Windscherung und einen Zerfall in kleinere kohärente Strukturen erklärt werden. Im Vergleich zum Nordsektor kann der Westsektor durch sehr homogene kohärente Strukturen charakterisiert werden. Die größte Abweichung von der Verwirbelungsschichttheorie kann in den kohärenten Strukturen bei Anströmung aus dem Südostsektor sowohl in den vektoriellen, als auch skalaren Variablen beobachtet werden. Ein deutlicher Trend von kleineren kohärenten Strukturen mit abnehmender Messhöhe ist zu erkennen. Der durch die starke Windscherung hervorgerufene Zerfall von großen kohärenten Strukturen in kleinere ist auch hier die mögliche Erklärung für die Beobachtung.

Tab. 1: Übersicht der Anzahl der verbleibenden 30 min Intervalle nach der Qualitätsüberprüfung und errechnete m-Werte (siehe Gl. ( 5 )) getrennt für die 3 Hauptsektoren der Anströmrichtung

Variable Höhe über Grund	Anzahl der 30 min In- tervalle im Sektor			m-Werte im Sektor und (Korrelationskoeffizient)		
	N	W	SE	N	W	SE
<b>Vertikalwind w</b>						
33.1 m	707	856	966	7.5 (0.33)	10.1 (0.43)	17.2 (0.51)
22.4 m	705	851	983	8.2 (0.40)	10.0 (0.48)	15.4 (0.53)
17.7 m	617	661	742	5.5 (0.25)	11.0 (0.53)	14.3 (0.45)
13.6 m	633	619	742	5.1 (0.25)	11.4 (0.50)	14.4 (0.48)
5.6 m	289	288	243	10.9 (0.30)	11.9 (0.30)	18.9 (0.56)
<b>Horizontalwind v<sub>h</sub></b>						
33.1 m	615	720	846	11.7 (0.27)	15.0 (0.29)	34.4 (0.54)
22.4 m	628	741	861	12.8 (0.34)	15.1 (0.38)	30.7 (0.54)
17.7 m	559	598	683	5.9 (0.19)	14.4 (0.45)	23.7 (0.52)
13.6 m	580	542	683	8.1 (0.29)	13.6 (0.44)	17.0 (0.39)
5.6 m	280	273	234	6.1 (0.18)	10.2 (0.31)	20.0 (0.54)
<b>Windrichtung <math>\phi</math></b>						
33.1 m	650	755	904	10.1 (0.33)	13.6 (0.38)	29.0 (0.50)
22.4 m	626	753	910	9.5 (0.32)	12.3 (0.39)	26.4 (0.56)
17.7 m	583	616	726	3.6 (0.15)	13.3 (0.46)	21.8 (0.55)
13.6 m	568	587	704	3.6 (0.14)	12.3 (0.44)	16.5 (0.48)
5.6 m	275	275	228	11.7 (0.27)	14.7 (0.42)	28.6 (0.49)
<b>Temperatur T</b>						
33.1 m	600	729	901	9.3 (0.27)	11.5 (0.30)	24.5 (0.48)
22.4 m	657	728	924	7.6 (0.26)	11.1 (0.31)	20.4 (0.50)
17.7 m	563	583	703	7.7 (0.25)	14.7 (0.45)	15.8 (0.38)
13.6 m	586	564	687	7.9 (0.26)	12.4 (0.43)	12.1 (0.32)
5.6 m	192	212	177	13.6 (0.19)	17.4 (0.27)	21.2 (0.23)
<b>Kohlendioxid CO<sub>2</sub></b>						
33.1 m	580	651	913	7.8 (0.24)	15.0 (0.24)	22.7 (0.47)
22.4 m	475	612	644	4.5 (0.12)	10.7 (0.29)	23.4 (0.35)
<b>Wasserdampf H<sub>2</sub>O</b>						
33.1 m	571	620	868	7.5 (0.23)	13.4 (0.25)	19.6 (0.39)
22.4 m	456	573	605	2.8 (0.05)	14.4 (0.12)	25.7 (0.35)

### 3.2 Flussanteil der kohärenten Strukturen, Charakterisierung der Austauschbedingungen

Der Anteil der kohärenten Strukturen an den Gesamtflüssen von Impuls, fühlbarer und latenter Wärme und des Kohlendioxids wurde mit dem im Kapitel 7.3 beschriebenen Verfahren der bedingten Probenahme (conditional sampling) und des daraus abgeleiteten bedingten Mittels (conditional average) berechnet. Zur Flussberechnung wurden die qualitätsgeprüften Originalzeitreihen mit einer Probenahmefrequenz von 20 Hz (33.1 m, 22.4 m) bzw. 10 Hz (17.7 m, 13.6 m, 5.5 m) verwendet. Die Probenahme der einzelnen Teilstücke in einer Zeitreihe, die die individuellen kohärenten Strukturen beinhalten, wurde innerhalb eines 30 min Intervalls nach den Zeitpunkten der kohärenten Strukturen in der Temperatur durchgeführt. Dies bedeutet, dass alle Zeitreihen vektorieller oder skalarer Größen, die an einer Messhöhe gemessen und aufgezeichnet wurden, zu den Zeitpunkten des Auftretens kohärenter Strukturen in der jeweiligen Zeitreihe



der Temperatur beprobt wurden. Die Wahl einer bestimmenden Variablen ist notwendig, um die Vergleichbarkeit der Flussanteile zwischen den einzelnen Flüssen zu gewährleisten. Die Temperatur wurde aus folgenden Gründen ausgewählt: (a) die in ihr enthaltenen kohärenten Strukturen sind i.d.R. als deutliche Rampen ausgeprägt und gewährleisten somit eine hohe Detektionsgenauigkeit und –zuverlässigkeit, (b) die Temperatur wurde als einzige skalare Größe hochfrequent im gesamten Vertikalprofil erfasst, (c) die gute zeitliche Verfügbarkeit der Temperaturzeitreihen gegenüber denen der Kohlendioxidkonzentration oder des Wasserdampfes, deren Verfügbarkeit aufgrund ihrer Erfassung mithilfe eines Open-path Analysators deutlich von dem Vorhandensein von Nebel oder Niederschlag abhängen und (c), um die Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen anderer Autoren zu sicherzustellen, die ebenfalls die Temperatur als bestimmende Variable verwendeten (z.B. Collineau and Brunet, 1993b). Im Falle einer offensichtlichen Fehlbestimmung kohärenter Strukturen in der Temperatur wurden ersatzweise die Zeitreihen des Kohlendioxids oder des Vertikalwindes als bestimmende Variablen herangezogen.

Die ermittelten Flüsse des bedingten Mittels wurden strengen Qualitätskriterien unterworfen. So wurden berechnete Flüsse verworfen, wenn (a) innerhalb des 30 min Intervalls Niederschlag fiel oder Nebel festgestellt wurde, (b) die Anzahl detektierter kohärenter Strukturen  $N$  in der Zeitreihe der Temperatur oder der Ersatzvariablen in einem Intervall  $k$  mehr als doppelt so groß oder weniger als die Hälfte des vorherigen Intervalls betrug, also wenn  $N_k(T) > 2 \cdot N_{k-1}(T)$  oder

$N_k(T) < \frac{1}{2} \cdot N_{k-1}(T)$ , (c) die atmosphärische Stabilität  $\zeta = \frac{z-d}{L} > 1$  oder  $\zeta < -1$  betrug, (d) der

Gesamtfluss des bedingten Mittels für das 30 min Intervall nicht repräsentativ war, d.h.  $\langle x'y' \rangle / \overline{x'y'} > 1.2$  oder  $\langle x'y' \rangle / \overline{x'y'} < 0.8$  (siehe Kapitel 7.3, Gl. (4)). Nach der Anwendung der Qualitätskriterien verblieben in der Messhöhe 33.1 m 2168 Datenpunkte, in 22.4 m 2320 Datenpunkte, in 17.7 m 1840 Datenpunkte, in 13.6 m 1697 Datenpunkte und in 5.5 m 229 Datenpunkte. Abb. 7 stellt die berechneten bedingten Mittel und deren Flussanteile am Beispiel des 10.06.2003 in einer Höhe von 33.01 m dar.

Die Repräsentativität des bedingten Mittels am Gesamtfluss war für alle berechneten Flüsse in allen Messhöhen sehr hoch. Für die oberen vier Messhöhen des Vertikalprofils aus Ultraschallanemometern und Gasanalysatoren auf 33.1 m, 22.4 m, 17.7 m und 13.6 m galt für ca. 90% aller analysierten Flüsse  $0.8 \leq \langle x'y' \rangle / \overline{x'y'} \leq 1.2$ . Die Messhöhe auf 5.5 m wich deutlich davon ab, da ca. nur 50% aller berechneten Flüsse in diesem Bereich lagen. Ein Grund dafür ist die nur vergleichsweise geringe Ausprägung der kohärenten Strukturen in den Zeitreihen aller Variablen, da die Turbulenz im unteren Bereich des Stammraums deutlich eingeschränkt ist.

Die statistische Auswertung des Anteils der kohärenten Strukturen am Gesamtfluss ist in Abb. 8 für den Impulsaustausch und den Austausch fühlbarer Wärme und in Abb. 9 für den Kohlendioxid- und Wasserdampfaustausch in den einzelnen Messhöhen dargestellt. Für den Impulsaustausch ergibt sich, dass der Flussbeitrag der kohärenten Strukturen im Mittel 10 % bis 20 % am Gesamtfluss beträgt, wobei 40 % nicht überschritten werden. Der absolute Betrag variiert dabei leicht mit der Messhöhe, und ist in einer Messhöhe von 22.4 m am größten. Diese Messhöhe ist nahe dem Kronenraum und weist hohe Windgeschwindigkeiten bei gleichzeitiger großer Windscherung auf. In 13.6 m Messhöhe sinkt der Anteil der kohärenten Strukturen im Impulsfluss auf durchschnittlich 10 % ab. Die Verteilung in 5.5 m zeigt kein deutliches Maximum, weist jedoch auf einen abnehmenden Anteil der kohärenten Strukturen am Gesamtfluss hin. Collineau and Brunet (1993b) fanden einen Impulsflussanteil der kohärenten Strukturen von 26 % bis 31 % bei der Analyse eines 30 min Intervalls. Der Anteil der kohärenten Strukturen am fühlbaren Wärmefluss beträgt im Mittel 20 % bis 30 %. Es treten aber durchaus Situationen mit 45 % Flussanteil auf, in seltenen Fällen werden sogar bis zu 60 % erreicht. Die Verteilungen der Messhöhen 33.1 m, 22.4 m und 17.7 m weisen ein sehr einheitliches Bild auf, wobei diejenige in

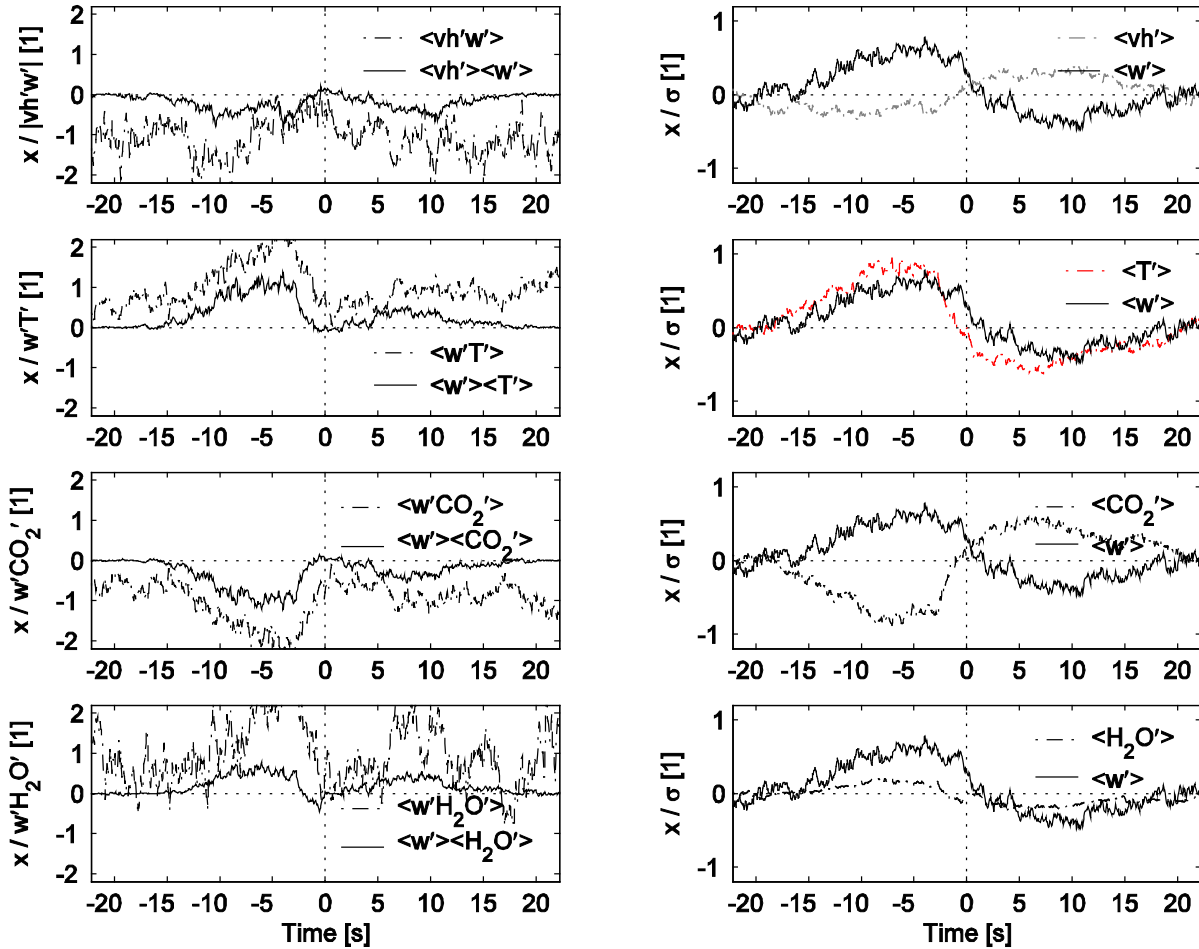


Abb. 7: Berechnung des Flussanteils der kohärenten Strukturen am Gesamtfluss mithilfe der bedingten Probenahme am Beispiel des 10.06.2003 12:30 während WALDATEM-2003 in der Messhöhe 33.01 m; Probenahmefrequenz der Originalzeitreihen ist 20 Hz; Anzahl der detektierten Strukturen  $N(T)$  ist 40, die mittlere Ereignislänge der kohärenten Strukturen  $D_e$  ist 22.2 s; dargestellt sind (von oben nach unten) Impulsfluss, fühlbarer Wärmefluss, Kohlendioxidfluss und latenter Wärmefluss; rechts: normierte bedingte Mittel der einzelnen Zeitreihen; links: normierte Kreuzprodukte der bedingten Mittel (Fluss der kohärenten Strukturen) und normierte bedingte Mittel des Kreuzproduktes (Gesamtfluss).

13.6 m deutlich breiter ist und Flussanteile größer 45 % leicht häufiger vorkommen. In 5.5 m zeigt die Verteilung kein Maximum, tendiert jedoch zu geringeren Werten. Collineau and Brunet (1993b) fanden in ihrer Analyse eines einzelnen 30 min Intervalls einen Flussbeitrag der kohärenten Strukturen am fühlbaren Wärmestrom von 40 %. Für den Kohlendioxid- und den Wasserdampfstrom ergibt sich, dass die kohärenten Strukturen einen mittleren Anteil von 20 % bis 30 % aufweisen, in seltenen Fällen können bis zu 55 % erreicht werden. Eine deutliche Abhängigkeit von der Messhöhe konnte dabei nicht festgestellt werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die kohärenten Strukturen einen erheblichen Flussanteil von bis zu 10 bis 30 % im Mittel aufweisen. Spitzenwerte erreichen dabei Anteile von bis zu 60 %. Der Transport von fühlbarer und latenter Wärme und Kohlendioxid durch kohärente Strukturen ist dabei effektiver als der Transport von Impuls. Die erzielten Resultate zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen anderer Autoren, die anhand von Einzelfällen durch Freilandmessungen oder Laborstudien gewonnen wurden (Antonia et al., 1987; Antonia and Fulachier, 1989; Collineau and Brunet, 1993b).

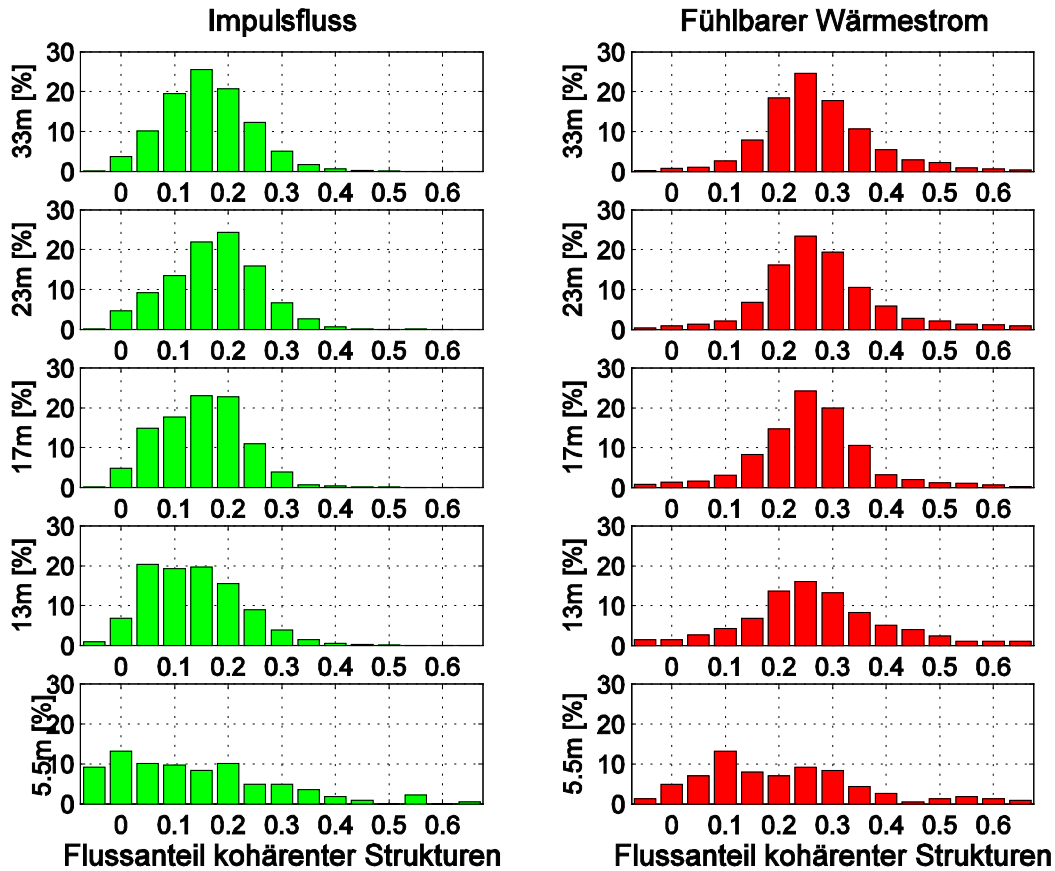


Abb. 8: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des relativen Flussanteils kohärenter Strukturen (Gl. (4), B / A) am Gesamtfluss für den Impulsfluss (links) und den fühlbaren Wärmestrom (rechts) in den einzelnen Messhöhen des Vertikalprofils am Turm bestimmt durch die Methode der bedingten Mittel während WALDATEM-2003.

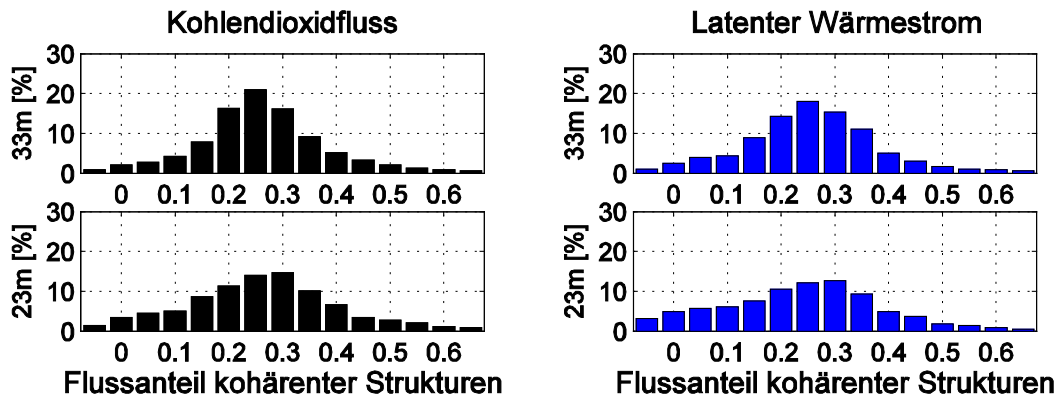


Abb. 9: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des relativen Flussanteils kohärenter Strukturen (Gl. (4), B / A) am Gesamtfluss für den Kohlendioxidfluss (links) und den latenten Wärmestrom (rechts) in den einzelnen Messhöhen des Vertikalprofils am Turm bestimmt durch die Methode der bedingten Mittel während WALDATEM-2003.

Auf Grundlage der statistischen Verteilungen lassen die erzielten Ergebnisse keine Rückschlüsse auf die ablaufenden Prozesse im und über dem Wald zu. Anhand zweier ausgewählter Tagesgänge sollen nun Prozesse dargestellt werden, die die Variabilität des turbulenten Austausches zwischen dem Wald und der Atmosphäre darstellen.

Abb. 10 stellt den Tagesgang einiger berechneter Größen am 08.06.2003 dar. Die dynamische Schichtung in der wolkenlosen Nacht vom 07.06. auf den 08.06 lässt sich als stabil bezeichnen ( $\zeta \approx 0.3$ ), es herrschen mäßige Horizontalwinde ( $v_h \approx 3 \text{ ms}^{-1}$ ) aus SE Richtung vor, das Maximum der Ausstrahlung ist in 33.1 m Messhöhe um 04:00 MEZ zu beobachten. Bei der stabilen Schichtung bewirken vor allem die abwärtsgerichteten Bewegungen (sweeps) einen nennenswerten Flussanteil ( $sw/ej \gg 1$ ), wobei Atmosphäre und Bestand voneinander entkoppelt sind. Die kohärenten Strukturen zeigen in den vektoriellen und skalaren Größen eine gute Übereinstimmung in ihrer Ereignislänge und den m-Verhältnissen ( $m_{vh}/m_w \approx m_\phi/m_w \approx m_T/m_w \approx m_{CO_2}/m_w \approx m_{H_2O}/m_w \approx 1 - 1.5$ ). Gegen 06:00 MEZ geht die stabile nächtliche Schichtung in eine neutrale Schichtung über. Es wird deutlich, dass die Erwärmung und damit der fühlbare Wärmefluss in 23.4 m Messhöhe am größten ist. Aus dem Verhältnis  $sw/ej < 0$  in 13.6 m Messhöhe lässt sich schließen, dass die Auf- und Abwärtsbewegungen unterschiedliche Flussrichtungen aufweisen. In der darüber liegenden Messhöhe jedoch weisen die Flussanteile der Auf- und Abwärtsbewegungen in dieselbe Richtung. Dies deutet auf eine Umwälzung von Luft innerhalb des Stammraumes und im unteren Bereich der Baumkrone hin, d.h. der Wald ist noch nicht mit der Atmosphäre gekoppelt und steht noch nicht im Austausch. Dieser Entkopplungszustand dauert bis ca. 08:00 MEZ an. Um 08:00 MEZ erreicht der Anteil der kohärenten Strukturen am Gesamtfluss fühlbarer Wärme 90 %. Nach 08:00 MEZ ist  $sw/ej > 0$  in 13.6 m, der Fluss fühlbarer Wärme jedoch insgesamt immer noch kaum unterschiedlich von Null. Ab 09:00 MEZ setzen in der Messhöhe 13.6 m und kurz darauf auch in den Messhöhen 17.7 m und 23.4 m starke sweeps ein ( $sw/ej \gg 1$ ), die vor allem im Impulsfluss und im fühlbaren Wärmestrom zu erkennen sind. Ab 09:00 MEZ deutet das Ansteigen der atmosphärischen Flüsse in der Messhöhe 13.4 m auf eine zunehmende Ankopplung des Stammraumes an die Atmosphäre hin, die um 11:00 MEZ ihr Maximum erreicht. Ab 14:00 MEZ ziehen Wolken auf, und der Betrag der Flüsse geht zurück. Ab 16:00 MEZ stellt sich über dem Bestand in 33.1 m Messhöhe eine stabile Schichtung ein. Die Austauschbedingungen zwischen Stamm- und Kronenraum und der Atmosphäre lassen sich insgesamt als nur zeitweise bedingt gekoppelt beschreiben. Der Flussanteil der kohärenten Strukturen am Gesamtfluss entsprach im Mittel den gefundenen statistischen Verteilungen, d.h. 20 % für den Impulsaustausch und 30 % für die skalaren Flüsse. Ein weiteres Beispiel eines Tagesganges ist darauf folgenden Tag, dem 09.06.2003 in Abb. 11 zu sehen. Die dynamische Schichtung in der Nacht ist durch die bis ca. 08:00 MEZ vorhandene Bewölkung nur leicht stabil bis neutral geschichtet ( $0.2 \geq \zeta \geq 0$ ), es herrscht eine Anströmung aus W mit Windgeschwindigkeiten mit  $3 - 4 \text{ ms}^{-1}$  vor. Gegen 08:00 MEZ lockert sich die Bewölkung auf und die turbulenten Flüsse steigen in ihrem Betrag an. Im Gegensatz zu Vortag ist keine deutliche Entkopplung des Stamm- und Kronenraumes mit der Atmosphäre zu beobachten. Im Zeitraum von 08:00 bis 13:00 MEZ sind auf allen dargestellten Messhöhen sehr kräftige sweeps zu erkennen, die vor allem den Austausch von Impuls und skalaren Größen innerhalb des Kronenraumes dominieren ( $sw/ej \gg 1$ ). Auch der Absolutbetrag des Flussanteils der sweeps im fühlbaren Wärmestrom  $\langle x'_{cs} \rangle \langle T'_{cs} \rangle_{sw}$  deutet darauf hin, dass eine einheitliche Kopplung zwischen Wald und Atmosphäre besteht. Die durch die Einstrahlung bedingte Erwärmung des Kronenraumes ist in den Messhöhen 23.4 m und 17.7 m am größten. Ab 13:00 MEZ nimmt die Intensität der sweeps ab ( $sw/ej \leq 1$ ), es deutet jedoch nichts auf eine zunehmende Entkopplung hin. Gegen 18:00 MEZ stabilisiert sich die Schichtung und die Flüsse gehen in ihrem Betrag zurück. Zusammenfassend lassen sich die Austauschbedingungen als durchgehend gekoppelt zwischen 08:00 und 18:00 MEZ

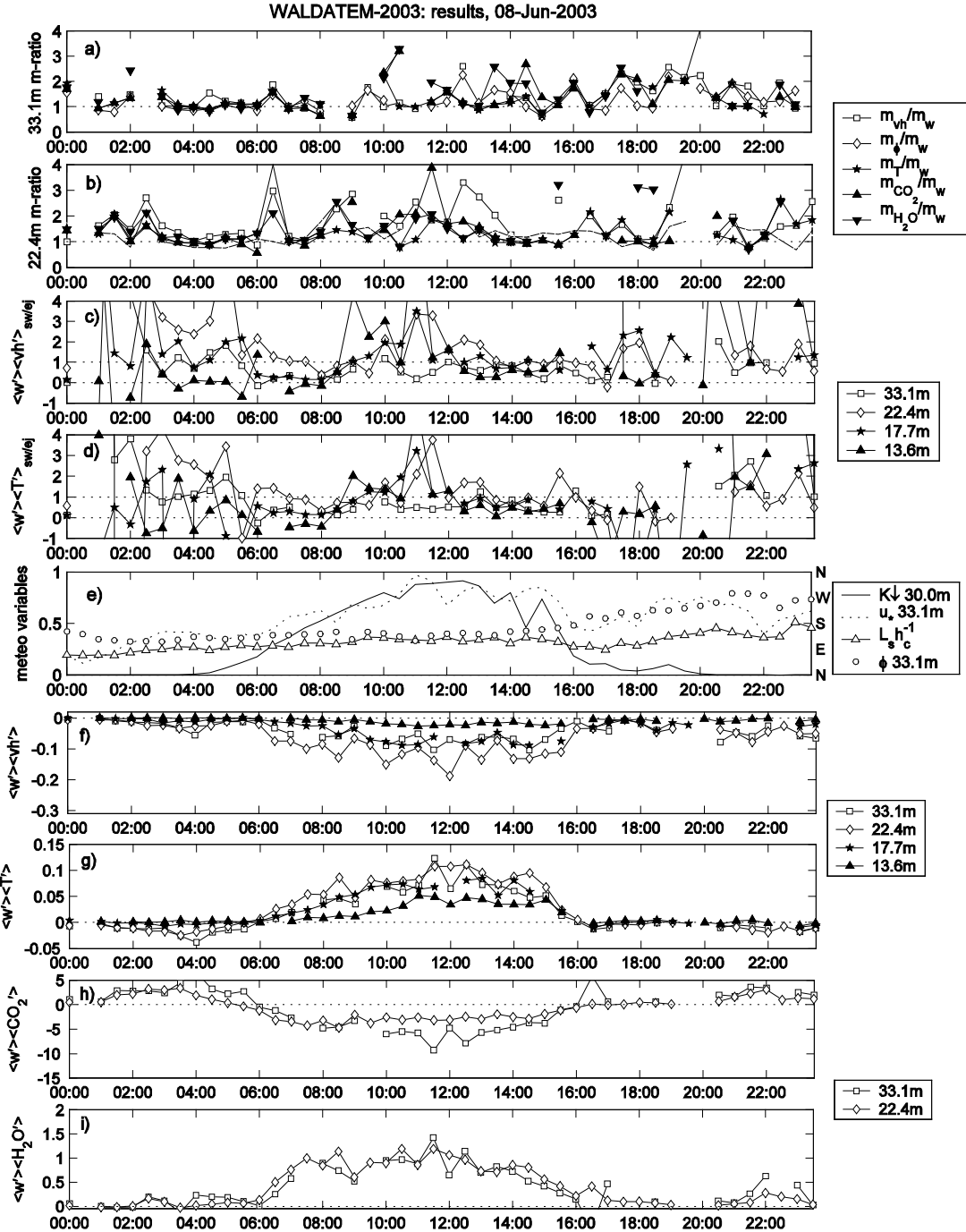


Abb. 10: Tagesgang ausgewählter Variablen kohärenter Strukturen am 08.06.2003 (von oben nach unten): **a)** normierte m-Verhältnisse auf 33.1m [1]; **b)** normierte m-Verhältnisse auf 22.4m [1]; **c)** Verhältnis  $sw/ej$  des Impulsflusses kohärenter Strukturen [1]; **d)** Verhältnis  $sw/ej$  des fühlbaren Wärmestroms kohärenter Strukturen [1]; **e)** Meteorolog. Variablen: Globalstrahlung  $K\downarrow$  (30.0m) [ $kWm^{-2}$ ], Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_*$  (33.1m) [ $ms^{-1}$ ], Windscherungsskala  $L_s$  [1], Windrichtung  $\phi$  (33.1m); **f)** Impulsfluss kohärenter Strukturen [ $m^2s^{-2}$ ]; **g)** fühlbarer Wärmestrom kohärenter Strukturen [ $Kms^{-1}$ ]; **h)** Kohlendioxidfluss kohärenter Strukturen [ $\mu molm^{-2}s^{-1}$ ]; **i)** latenter Wärmestrom kohärenter Strukturen [ $mmolm^{-2}s^{-1}$ ]

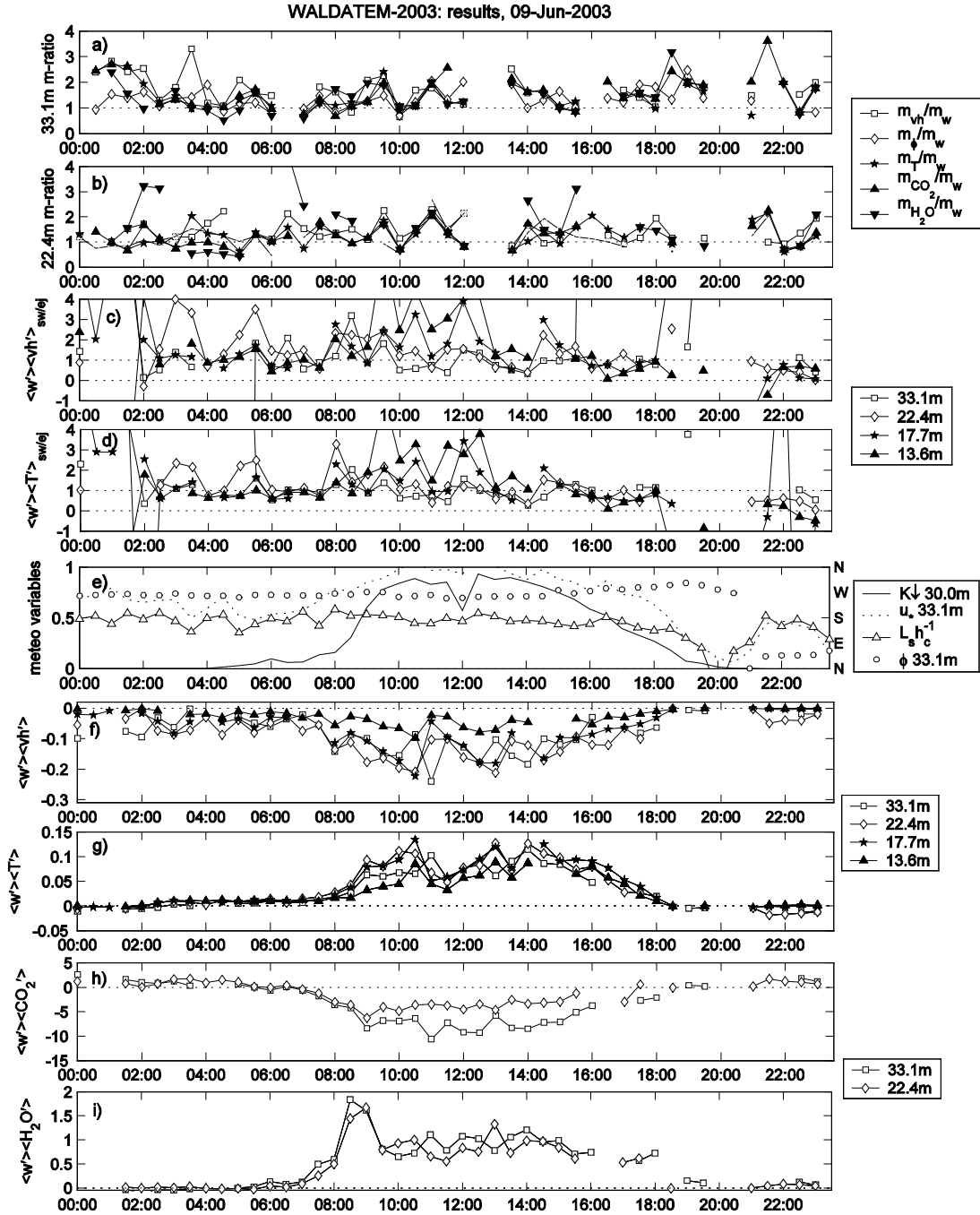


Abb. 11: Tagesgang ausgewählter Variablen kohärenter Strukturen am 09.06.2003 (von oben nach unten): **a)** normierte m-Verhältnisse auf 33.1m [1]; **b)** normierte m-Verhältnisse auf 22.4m [1]; **c)** Verhältnis  $sw/ej$  des Impulsflusses kohärenter Strukturen [1]; **d)** Verhältnis  $sw/ej$  des fühlbaren Wärmestroms kohärenter Strukturen [1]; **e)** Meteorolog. Variablen: Globalstrahlung  $K\downarrow$  (30.0m) [ $kWm^{-2}$ ], Schubspannungsgeschwindigkeit  $u_s$  (33.1m) [ $ms^{-1}$ ], Windscherungsskala  $L_s$  [1], Windrichtung  $\phi$  (33.1m); **f)** Impulsfluss kohärenter Strukturen [ $m^2s^{-2}$ ]; **g)** fühlbarer Wärmestrom kohärenter Strukturen [ $Kms^{-1}$ ]; **h)** Kohlendioxidfluss kohärenter Strukturen [ $\mu molm^{-2}s^{-1}$ ]; **i)** latenter Wärmestrom kohärenter Strukturen [ $mmolm^{-2}s^{-1}$ ]

beschreiben. Dieser Austausch wird vor allem durch die kräftigen sweeps vollzogen, deren Fluss in diesem Zeitraum auf allen Messhöhen nahezu identisch ist.

Zur Charakterisierung der ablaufenden Austauschprozesse zwischen Wald und Atmosphäre eignen sich vor allem die getrennte Betrachtung von Flussanteilen der sweeps  $\langle x'_{cs} \rangle \langle y'_{cs} \rangle_{sw}$  und

ejections  $\langle x'_{cs} \rangle \langle y'_{cs} \rangle_{ej}$  im gesamten Profil. Das Vorzeichen und der Betrag ihres Verhältnisses  $sw/ej$  lassen Rückschlüsse auf lokal unterbundenen Austausch zu. Die zeitliche Variation des

Flussanteiles der kohärenten Strukturen am Gesamtfluss  $\langle x'_{cs} \rangle \langle y'_{cs} \rangle / \langle x'y' \rangle$  kann ebenfalls zur

Charakterisierung herangezogen werden. Hier lassen vor allem kurzfristige Veränderungen auf eine einsetzende Kopplungsprozesse durch kohärente Strukturen schließen. Es konnte keine Übereinstimmung der Austauschbedingungen mit den m-Verhältnissen der einzelnen Variablen oder den m-Verhältnissen der Variablen zueinander gefunden werden. Dieses Ergebnis wird durch die Analyse der dynamischen Eigenschaften der kohärenten Strukturen in Kapitel 8.1 untermauert, die eine starke Höhen- und Windrichtungsabhängigkeit der  $m_x/m_w$  Verhältnisse im Mittel belegen. Nur eine umfassende Beurteilung und Interpretation der oben erwähnten Größen und meteorologischer mittlerer Variablen lassen eine zuverlässige Beurteilung der Austauschbedingungen zwischen Wald und Atmosphäre zu.

### 3.3. Untersuchung der kohärenten Strukturen mit der akustischen Schallsondierung

Zusätzlich zu den Analysen der kohärenten Strukturen in den Zeitreihen des Vertikalprofils bestehend aus den Ultraschallanemometern und den Gasanalysatoren wurden kohärente Strukturen auch mithilfe der fernerkundlichen akustischen Schallsondierung (SODAR-RASS) gemessen und untersucht. Diese Messungen wurden im Rahmen von Teilnahmen an den Messkampagnen des afo2000-Projekts ECHO in den Jahren 2002 und 2003 vorbereitet. Die Verwendung eines SODAR-RASS Gerätes war nur die enge Kooperation mit dem Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz möglich, das das Gerät für die Dauer von WALDATEM-2003 zur Verfügung stellte.

Eine Optimierung der Messparameter wurde unter den Anforderungen einer hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung der Messungen geeignet für die Erfassung und Analyse der kohärenten Strukturen durchgeführt. Somit konnten Zeitreihen der akustischen Rückstreuintensität und des Vertikalwindes mit einer zeitlichen Auflösung von 0.4 Hz in einer Messhöhe von 35 m bis 145 m über Grund in einem vertikalen Abstand von 10 m aufgezeichnet werden. Das SODAR-RASS System wurde im Pflanzgarten am Weidenbrunnen in unmittelbarer Nähe zu dem dort installierten Gasmesscontainer aufgebaut und betrieben. Die Qualitätskontrolle der gemessenen Zeitreihen wurde mit einem speziell für diesen Zweck selbstentwickeltem Bewertungsschema durchgeführt, das auf der Länge und Häufigkeit von Lücken in den aufgezeichneten Zeitreihen beruht. Die anschließende Analyse der qualitätsgeprüften Zeitreihen wurde ebenfalls mit der selbstentwickelten Software WALDSCHRAT durchgeführt. Details der Messungen, des erarbeiteten Qualitätsbewertungsschemas und der Ergebnisse werden in Thomas et al. (2005) veröffentlicht.

Das Ziel dieser Untersuchungen war es, die Anwesenheit kohärenter Strukturen in der Luftschicht über dem Wald nachzuweisen und deren dynamische Eigenschaften abzuleiten. Um die Anwesenheit kohärenter Strukturen in benachbarten Messhöhen des akustischen Schallsondierungssystems nachzuweisen, wurde der Korrelationskoeffizient  $R_s$  zwischen dem Waveletvarianzspektrum einer Referenzmesshöhe und dem einer anderen Messhöhe eingeführt. Das Waveletvarianzspektrum gibt durch seine Maxima die charakteristischen Ereignisdauern von kohärenten Strukturen wieder. Ein Vergleich zweier Spektren unterschiedlicher Messhöhen lässt also Rückschlüsse auf die Anwesenheit kohärenter Strukturen mit denselben oder anderen Eigenschaften zu. Als Referenzmesshöhe wurde dabei das unterste Messniveau in 35

m über Grund ausgewählt, um eine Anbindung der Ergebnisse an das Vertikalprofil der Ultraschallanemometer und der Gasanalysatoren zu erreichen, deren oberste Messhöhe sich in 33.1 m über Grund am ca. 250 m entfernt gelegenen Turm befand.

Abb. 12 zeigt Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der charakteristischen Ereignisdauern kohärenter Strukturen als Funktion der Messhöhe. Die Verteilung zeigt ein deutliches globales Maximum bei 10 s bis 30 s Ereignisdauer und ein zweites lokales Maximum zwischen 190 s und 220 s Ereignisdauer. Diese Maxima sind in allen Messhöhen vorhanden. Die charakteristischen kürzeren kohärenten Strukturen von 10 s bis 30 s Ereignisdauer stimmen sehr gut mit den Ergebnissen der Ultraschallanemometer und der Gasanalysatoren überein. Daraus wird geschlossen, dass beide Messverfahren unabhängig voneinander dieselben kohärenten Strukturen beobachten. Die längeren kohärenten Strukturen mit 190 s bis 220 s Ereignisdauer zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen anderer Autoren (Petenko et al., 2004), die konvektive kohärente Strukturen in höheren Luftschichten zur Mittagszeit untersuchten.

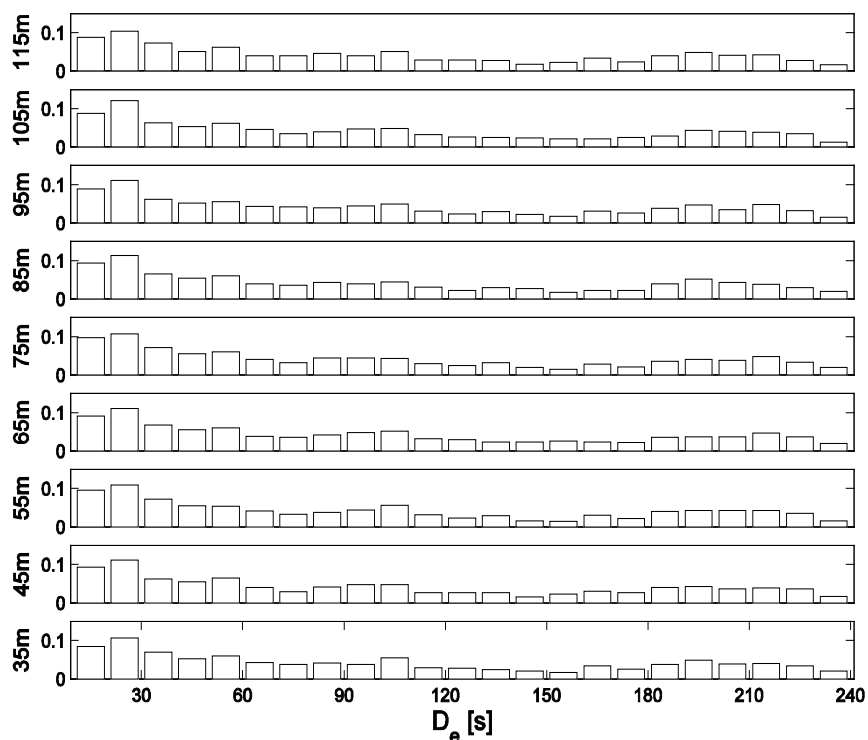


Abb. 12: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der charakteristischen Ereignisdauern  $D_e$  kohärenter Strukturen im Vertikalwind für die einzelnen Messhöhen gemessen mit der akustischen Schallsondierung während WALDATEM-2003.

Abb. 13 zeigt die Ergebnisse der Analyse der kohärenten Strukturen in den Zeitreihen des Vertikalwindes anhand des berechneten Korrelationskoeffizienten  $R_s$ . Dargestellt ist der mittlere Tagesgang einer Periode von 15 ausgewählten Tagen, die in ihren meteorologischen Randbedingungen ähnlich waren.  $R_s$  zeigt eine deutliche Abhängigkeit von der Tageszeit. Innerhalb des Zeitraumes von 05:00 MEZ bis 19:00 MEZ ist die spektrale Korrelation zwischen allen Messhöhen  $R_s \geq 0.3$ . Bereiche mit  $R_s \geq 0.5$  geben zeitlich eingeschränkte Phasen erhöhter Korrelation zwischen dem Referenzniveau von 35 m und den darüber liegenden Messhöhen wieder, die mit  $R_s \geq 0.5$  bis zu einer Höhe von 85 m zwischen 11:00 und 14:00 MEZ ihr Maximum erreicht. Insgesamt ergibt sich eine hohe zeitliche und räumliche Dynamik, die wiederholte Kopplungs- und Entkopplungszustände zwischen den Messhöhen nahe des Kronenraumes und den darüber liegenden Luftschichten zeigt.



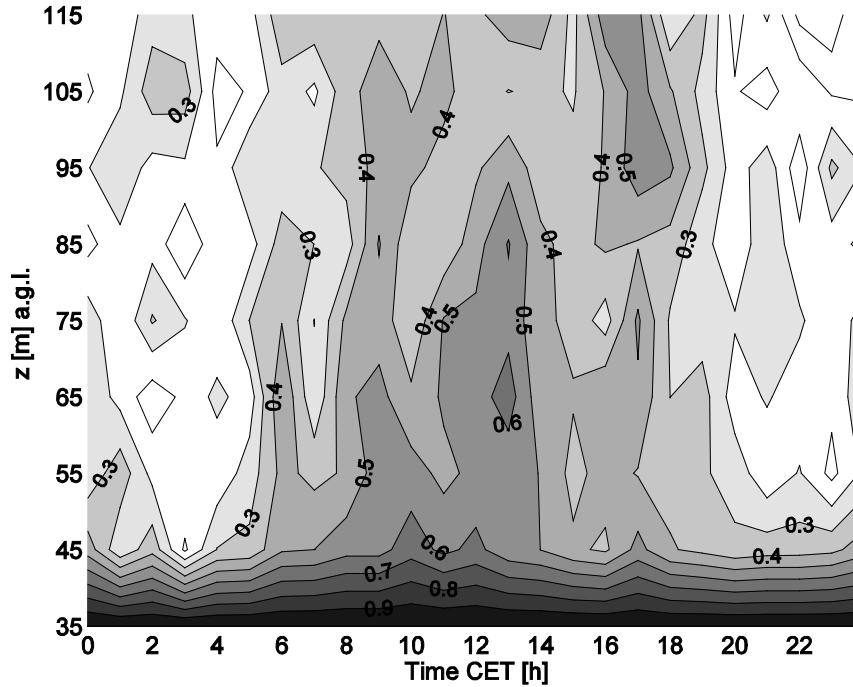


Abb. 13: Mittlerer Tagesgang des Korrelationskoeffizienten  $R_s$  zwischen dem Waveletvarianzspektrum der Referenzmesshöhe 35 m und den darüber liegenden Messhöhen  $z$  für Ereignisdauern von 10 s bis 240s über einen Zeitraum von ausgewählten Tagen ( $N=15$ ) während WALDATEM-2003 gemessen mit der akustischen Schallsondierung. CET = MEZ.

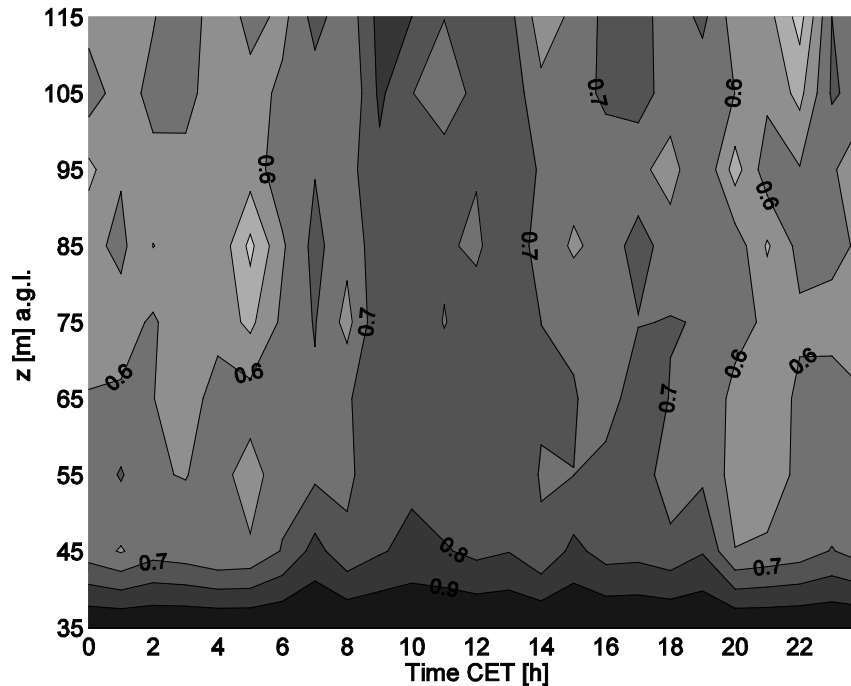


Abb. 14: Mittlerer Tagesgang des Korrelationskoeffizienten  $R_s$  zwischen dem Waveletvarianzspektrum der Referenzmesshöhe 35 m und den darüber liegenden Messhöhen  $z$  für Ereignisdauern von 10 s bis 60s über einen Zeitraum von ausgewählten Tagen ( $N=15$ ) während WALDATEM-2003 gemessen mit der akustischen Schallsondierung. CET = MEZ.

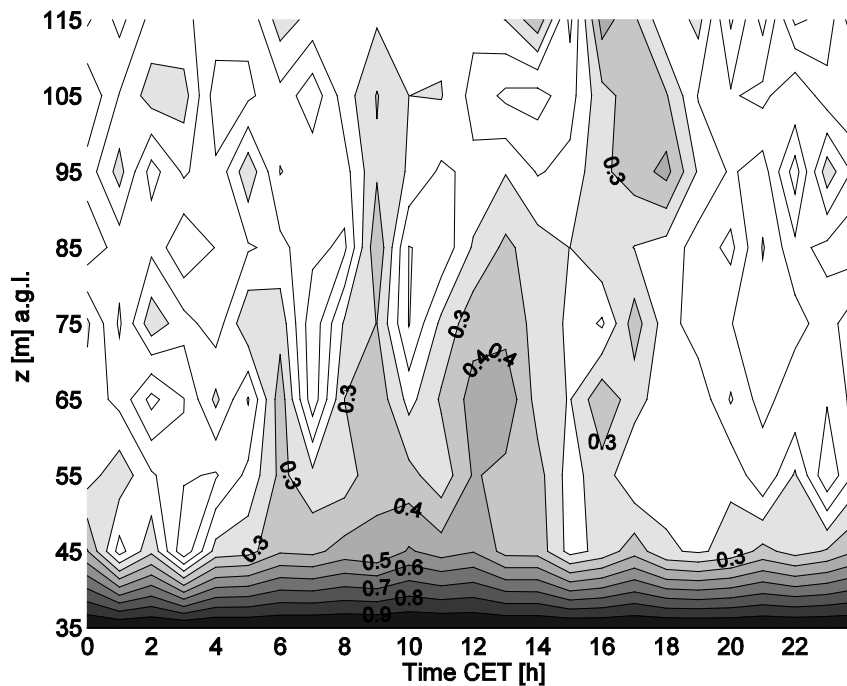


Abb. 15: Mittlerer Tagesgang des Korrelationskoeffizienten  $R_s$  zwischen dem Waveletvariansspektrum der Referenzmesshöhe 35 m und den darüber liegenden Messhöhen  $z$  für Ereignisdauern von 60 s bis 240s über einen Zeitraum von ausgewählten Tagen ( $N=15$ ) während WALDATEM-2003 gemessen mit der akustischen Schallsondierung. CET = MEZ.

Abb. 14 und Abb. 15 zeigen den berechneten Parameter  $R_s$  getrennt entsprechend für die kürzeren kohärenten Strukturen mit Ereignisdauern von 10 s bis 60 s und für die längeren kohärenten Strukturen mit Ereignisdauern von 60s bis 240 s. Die kürzeren kohärenten Strukturen weisen eine sehr deutliche Korrelation zwischen dem Referenzniveau in 35 m und den darüber liegenden Messhöhen mit  $R_s \geq 0.5$  auf. Das Maximum wird mit  $R_s \geq 0.7$  im Zeitraum zwischen 08:00 und 14:00 MEZ erreicht. Die kürzeren kohärenten Strukturen über dem Bestand existieren bis in eine Höhe von 115 m unabhängig von der Zeit (Abb. 14). Da die im vorigen Kapitel 8.2 dargestellten Kopplungs- und Entkopplungszustände eine hohe zeitliche Dynamik aufweisen, kann alleine aus der Existenz dieser kürzeren kohärenten Strukturen kein Rückschluss auf das Austauschregime zwischen Wald und Atmosphäre gezogen werden. Die gute Übereinstimmung mit den Ereignisdauern der kohärenten Strukturen, die in den Zeitreihen des Vertikalprofils aus Ultraschallanemometern und Gasanalysatoren nach der Verwirbelungsschichtanalogie ausgewertet wurden, legt nahe, dass diese kürzeren kohärenten Strukturen dynamischen Ursprungs sind. Die in Abb. 15 dargestellten längeren kohärenten Strukturen sind durch niedrigere Korrelationskoeffizienten  $R_s \leq 0.5$  gekennzeichnet. Sie zeigen eine deutliche zeitliche Dynamik mit einem maximalem  $R_s \geq 0.4$  um 12:00 MEZ in eine Höhe bis 65 m. Ein Vergleich der Abb. 13 und Abb. 15 zeigt, dass die in Abb. 13 vorhandene zeitliche und räumliche Dynamik durch die längeren kohärenten Strukturen zurück zuführen ist. Die deutliche Abhängigkeit der Existenz der längeren kohärenten Strukturen vom Strahlungsantrieb legt die Vermutung nahe, dass diese kohärenten Strukturen thermischen Ursprungs sind, also durch konvektive Prozesse entstehen. Das in allen drei Abbildungen um ca. 16:00 bis 18:00 Uhr ersichtliche Korrelationsmaximum  $R_s$  in einer Höhe von 90 m bis 115 m ist auf die einsetzende Stabilisierung der Luftschicht über dem Bestand zu erklären, die langsam von unten her einsetzt. Die Messhöhe 35 m hingegen wird noch durch die wärmere Luft aus dem Stamm- und Kronenraum beeinflusst.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Luftschicht über dem Wald durch das Vorhandensein kohärenter Strukturen unterschiedlicher Ereignisdauern geprägt ist. Diese kohärenten Strukturen haben deutlich unterschiedliche Ereignisdauern und sind vermutlich einerseits durch dynamische, andererseits durch thermische Ursachen hervorgerufen.

### 3.4 Modellierung des Energie- und Gasaustausches

Über hoher Vegetation versagen klassische Modellkonzepte nach dem K-Ansatz. Hauptursache sind Phänomene wie Entkopplung und Counter-Gradienten, die einen Austausch unterbinden können oder den Transport auch zwischen nicht benachbarten Schichten ermöglichen (Foken, 2003). Das untersuchte Phänomen kohärenter Strukturen ermöglicht sogar den Austausch über größere vertikale Distanzen. Als geeignetes Modellierungskonzept wird dabei die Modellierung nach der transilient Turbulenztheorie (Stull, 1984) angesehen. Das auf dieser Theorie beruhende Modell FLAME (Forest – Land – Atmosphere – ModEl, Incan et al., 1996) wurde im Rahmen eines Gastaufenthaltes an den Standort Weidenbrunnen angepasst und getestet. Genutzt wurde dafür ein 1998 gewonnener Datensatz (Mangold, 1999), wobei der großräumige Antrieb durch Analysen des Deutschlandmodells erfolgte. Die Ergebnisse des Vergleichs modellierter und gemessener turbulenter Flüsse zeigt Tab. 2. Die diesen Ergebnissen zugrunde liegende Transilientmatrix ist in Abb. 16 dargestellt. Sie gibt an, wie stark Quell- und Zielschichten miteinander gekoppelt sind. Dabei sieht man, dass im Stammraum, aber auch oberhalb des Bestandes der Austausch über größere Distanzen erfolgt. Demgegenüber ist im Kronenraum der Austausch weitgehend nur zwischen benachbarten Schichten möglich. Bislang nicht berücksichtigt sind bei dieser Modellierung Effekte kohärenter Strukturen. Die Untersuchungen dieses Projektes dienen jedoch der Vorbereitung deren Einbeziehung, wozu entsprechende Forschungsanträge bereits gestellt wurden.

Tab. 2: Statistische Untersuchung modellierter (Prediktor) und gemessener (Prediktant) latenter ( $Q_E$ ) und fühlbarer ( $Q_H$ ) Wärmeströme (N: Zahl der Fälle, r: Korrelationskoeffizient, s: Standardabweichung in  $W\ m^{-2}$ , a (in  $W\ m^{-2}$ ) und b: Regressionskoeffizienten) nach Berger et al. (2004).

	<i>N</i>	<i>r</i>	<i>s</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
$Q_E(7MEZ)$	20	0.837	29.7	3.1	0.92
$Q_E(13MEZ)$	10	0.893	19.4	27.2	0.75
$Q_H(7MEZ)$	25	0.912	51.7	-19.9	0.95
$Q_H(13MEZ)$	13	0.972	23.6	-57.5	0.93

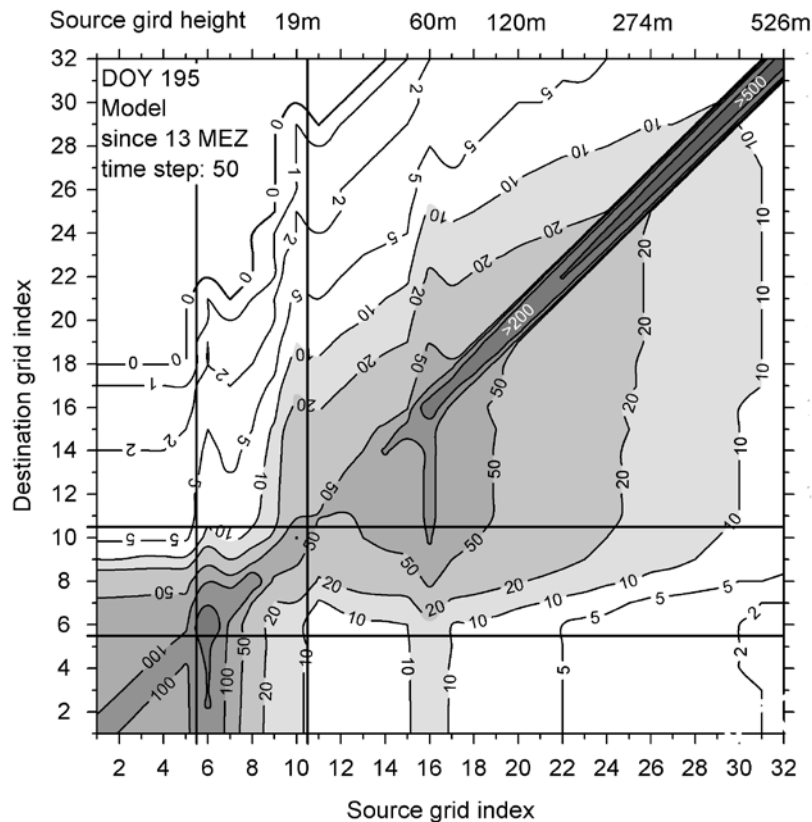


Abb. 16: Transilientmatrix am 14.07.1998 um 15:30 MEZ berechnet mit dem Antrieb aus dem Deutschlandmodell (Berger et al., 2004). Es sind jeweils die Kopplung zwischen Quell- und Zielschichten, die in Bodennähe eine geringere Schichtdicke haben, dargestellt. Die Bestandeshöhe ist durch Linien in der 10. Schicht dargestellt.

### 3.5 Modifikation der QA/QC Software

Die Verwendung der Eddy-Kovarianz Methode zur Berechnung atmosphärischer Flüsse verlangt eine strikte Qualitätskontrolle (Foken et al., 2004). Zu den wichtigsten Punkten zählen dazu die Aussortierung von Ausreißern in den aufgezeichneten Zeitreihen, die Überprüfung der Einhaltung plausibler meteorologischer Grenzen, statistische Test zur Aufdeckung von Instationaritäten, Überprüfung der Voraussetzungen für die Verwendbarkeit der Eddy-Kovarianz Methode und eine ortabhängige Überprüfung der Datenqualität anhand von Quellgebietsberechnungen. Weiterhin kommen ja nach Instrumentierung zahlreiche Korrektur- und Transformationsalgorithmen zur Anwendung, die teils systematische Effekte der verwendeten Messgeräte oder der Methodiken selber ausgleichen. Bislang ist keine Umsetzung der Ergebnisse aus der umfassenden Analyse der kohärenten Strukturen dieses Teilprojekts in einen zusätzlichen Qualitätsparameter aufgrund der komplexen Einzelprozesse erfolgt.

Als eine wesentliche Neuerung in der Berechnung der atmosphärischen Flüsse ist die Einführung der Rotation der gerateabhängigen Raumkoordinaten in die Raumkoordinaten der mittleren Strömung über einen längeren Zeitraum anzusehen. Dieses als Planar-Fit-Rotation bezeichnete Verfahren (Wilczak et al., 2001) berücksichtigt die mittleren Neigungen der Stromlinien an dem konkreten Messort, die durch das Messgerät selbst und die Topographie bestimmt werden. Das Planar-Fit-Verfahren wurde sowohl in der Software WALDSCHRAT (siehe Kapitel 7.3) als auch in der Software Turbulenzknecht TK2 (Mauder and Foken, 2004) implementiert. Der mittlere Vertikalwind einzelner 30 min Intervalle wird im Gegensatz zu klassischen 2D- oder 3D-Rotationsverfahren nicht durch Null gezwungen, sondern ergibt erst im langfristigen Mittel Null. In dieser Studie wurde die benötigte Rotationsmatrix für einen Zeitraum von jeweils einem Mo-

nat bestimmt, wobei diese auf dem 33.1 m Messniveau keine signifikante Abhängigkeit von Windrichtung und der Jahreszeit ergab. Durch den im Rahmen des Projektes durchgeführten Messgeräthewechsel von einem closed-path (Li6262) zu einem open-path (Li7500) Gasanalysator zur Erfassung der hochfrequenten Schwankungen der Konzentrationen von CO<sub>2</sub> und Wasserdampf, wurde die Anwendung einer weiteren Korrektur notwendig. Dieses als WPL-Korrektur (Webb et al., 1980) bezeichnete Verfahren korrigiert den Fluss durch die vernachlässigten Dichteschwankungen. Die WPL-Korrektur ist in der Software Turbulenzknecht TK2 (Mauder and Foken, 2004) enthalten. Weiterhin wurde die standortabhängige Bewertung der Datenqualität mithilfe von Quellgebietsuntersuchungen durchgeführt. Das hier angewendete Verfahren zur Berechnung räumlicher Strukturen in der Datenqualität an komplexen Standorten ist im Detail beschrieben in Göckede et al. (2004, 2005), und wurde im Kontext des CARBOEUROFLUX Workpackage 7 'Quality check and data basing' auf insgesamt 18 Monitoring Stationen dieses Projekts angewendet (Rebmann et al., 2005). Es wurde entwickelt zur Verbindung von meteorologischen Messungen mit Geländeinformationen. Dazu wird für jede Einzelmessung eines Beobachtungszeitraums eine Footprint-Analyse durchgeführt, deren resultierendes Quellgebiet projiziert wird auf die eingesetzte Matrix mit den Landnutzungs-Informationen. Unter der vereinfachenden Annahme, dass von allen Teilflächen der Umgebung ein Fluss mit der gleichen Quellstärke emittiert wird, werden die auf diese Weise zugeordneten Gewichtungsfaktoren sortiert nach Landnutzungsklassen und anschließend aufsummiert, um den Flussbeitrag jeder Klasse zu erhalten. Zusätzlich zur Bewertung der Landnutzungsstruktur im Quellgebiet der Messungen werden die ermittelten Gewichtungsfaktoren zusammen mit den Ergebnissen einer Qualitätsanalyse der gemessenen Flüsse in einer Datenbank abgelegt. Nach Bearbeitung der gesamten Experimentperiode werden diese Einträge statistisch ausgewertet, um für jede einzelne Zelle der Geländematrix die mittlere Datenqualität zu bestimmen. Hieraus ergeben sich die räumliche Struktur der Datenqualität bestimmter Flüsse sowie der relative Einfluss jeder Matrixzelle zum gemessenen Gesamtfluss. Das Ergebnis der gesamten Studie ist in der erweiterten Standortbeschreibung des Messstandortes Weidenbrunnen im Bericht des Teilprojektes A3 zu finden.

## 4. Veröffentlichungen

### 4.1. Publikationen in Zeitschriften mit Review-System 2001 – 2004

- Börngen, M; Foken, T; Hupfer, P (2004): 50 Jahre Grundschicht der Troposphäre, N.T.M., Birkhäuser Verlag, 12, 201-212
- Foken, T; Leclerc, MY (2004): Methods and limitations in validation of footprint models, *Agricultural and Forest Meteorology*, accepted
- Göckede, M; Rebmann, C; Foken, T (2004): A combination of quality assessment tools for eddy covariance measurements with footprint modelling for the characterisation of complex sites, *Agricultural and Forest Meteorology*, (accepted)
- Göckede, M., Markkanen, T., Hasager, C. B., und Foken, T. (2005). Use of footprint modelling for the characterisation of complex measurement sites, *Boundary-Layer Meteorol.*, (submitted).
- Knohl, A; Kolle, O; Minayeva, T; Miljukova, IM; Vygodskaya, NN; Foken, T; Schulze, E-D (2002): Carbon dioxide exchange of a Russian boreal forest after disturbance by wind throw, *Global Change Biology*, **8**, 231-246
- Liebethal, C; Foken, T (2003): On the Significance of the Webb Correction to Fluxes , *Boundary-Layer Meteorology*, **109**, 99-106
- Liebethal, C; Foken, T: On the significance of the Webb correction to fluxes, *Corrigendum, Boundary-Layer Meteorology*, 113, 301 (2004)
- Rebmann, C; Göckede, M; Foken, T; Aubinet, M; Aurela, M; Berbigier, P; Bernhofer, C; Buchmann, N; Carrara, A; Cescatti, A; Ceulemans, R; Clement, R; Elbers, JA; Granier, A; Grünwald, T; Guyon, D; Havránková, K; Heinesch, B; Knohl, A; Laurila, T; Longdoz, B; Marcolla, B; Markkanen, T; Miglietta, F; Moncrieff, JB; Montagnani, L; Moors, E; Nardino, M; Ourcival, J-M; Rambal, S; Rannik, Ü; Rotenberg, E; Sedlak, P; Unterhuber, G; Vesala, T; Yakir, D (2005): Quality analysis applied on eddy covariance measurements at complex forest sites using footprint modelling, *Theoretical and Applied Climatology*, accepted
- Reth, S; Göckede, M; Falge, E: CO<sub>2</sub> efflux from agricultural soils in Eastern Germany - comparison of a closed chamber system with eddy covariance measurements, *Theoretical and Applied Climatology*, accepted (2004)
- Thomas, C; Foken, T (2005): Detection of long-term coherent exchange over spruce forest, *Theoretical and Applied Climatology*, accepted

## 4.2 Sonstige Publikationen 2003/2004

- Aubinet, M; Clement, R; Elbers, JA; Foken, T; Grelle, A; Ibrom, A; Moncrieff, JB; Pilegaard, K; Rannik, Ü; Rebmann, C (2003): Methodology for data acquisition, storage and treatment in Valentini, R: Fluxes of Carbon, Water and Energy of European Forests, Ecological Studies, Springer-Verlag, 163, 9-35
- Berger, M; Dlugi, R; Foken, T (2004): Modeling the vegetation atmospheric exchange with a transillient model in Matzner, E.: Ecological Studies, Biogeochemistry of forested catchments in a changing environment: a German case study, Springer Verlag, 172, 177-190
- Bernhofer, C; Aubinet, M; Clement, R; Grelle, A; Grünwald, T; Ibrom, A; Jarvis, P; Rebmann, C; Schulze, E-D; Tenhunen, JD, (2003): Spruce Forests (Norway and Sitka spruce, including Douglas fire): Carbon and water fluxes and balances, ecological and ecophysiological determinants in Valentini, R: Fluxes of Carbon, Water and Energy of European Forests, Ecological Studies, Springer-Verlag, 163, 99-123
- Bernhofer, C; Aubinet, M; Clement, R; Grelle, A; Grünwald, T; Ibrom, A; Jarvis, P; Rebmann, C; Schulze, E-D; Beyrich, F; Adam, W; Bange, J; Behrens, K; Berger, F H; Bernhofer, C; Bösenberg, J; Dier, H; Foken, T; Göckede, M; Görsdorf, U; Güldner, J; Hennemuth, B; Heret, C; Huneke, S; Kohsiek, W; Lammert, A; Lehmann, V; Leiterer, U; Leps, J-P; Liebethal, C; Lohse, H; Lüdi, A; Mauder, M; Meijninger, WML; Mengelkamp, H-T; Queck, R; Richter, SH; Spieß, T; Tittbrand, A; Weisensee, U; Zittel, P (2004): Verdunstung über einer heterogener Landoberfläche, Das LITFASS-2003 Experiment, Deutscher Wetterdienst, Forschung und Entwicklung, Arbeitsergebnisse, 79, 100 S.
- Foken, T (2004): Climate change in the Lehstenbach region in Matzner, E.: Ecological Studies, Biogeochemistry of forested catchments in a changing environment: a German case study, Springer Verlag, 172, 59-66
- Culf, AD; Foken, T; Gash, JHC, (2004): The energy balance closure problem in Kabat et al.: Vegetation, water, humans and the climate. A new perspective on an interactive system, Springer, Berlin, Heidelberg, 159-166
- Foken, T (2003): Angewandte Meteorologie, Mikrometeorologische Methoden, Heidelberg/Berlin, Springer, 289 S.
- Foken, T (Hrsg.) (2003): Lufthygienisch-Bioklimatische Kennzeichnung des oberen Egertales, Bayreuther Forum Ökologie, 100, 69+XLVIII
- Foken, T (2001): Das Klima des oberen Egertales, Bayreuther Forum Ökologie, 90, 109-112
- Foken, T (2001): Untersuchungen zum Klima im Waldsteingebiet, Bayreuther Forum Ökologie, 90, 59-63
- Foken, T; Göckede, M; Mauder, M; Mahrt, L; Amiro, BD; Munger, JW (2004): Post-field data quality control. in Lee X., Massman W, Law B : Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurement and Analysis, Kluwer, Dordrecht, 81-108
- Gerstberger, P; Foken, T; Kalbitz, K (2004): The Lehstenbach and Steinkreuz catchments in NE Bavaria, Germany, Ecological Studies, Springer Verlag, 172, 15-44
- Mauder, M. and Foken, T. (2004): Documentation and instruction manual of the eddy covariance software package TK2, Arbeitsergebnisse, Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie. Print, ISSN 1614-8916. 26.
- Rebmann, C; Anthoni, P; Falge, E; Göckede, M; Mangold, A; Subke, J-A; Thomas, C; Wichura, B; Schulze, E-D; Tenhunen, JD (2003): Spruce Forests (Norway and Sitka spruce, including Douglas fire): Carbon and water fluxes and balances, ecological and ecophysiological determinants in Valentini, R: Fluxes of Carbon, Water and Energy of European Forests, Ecological Studies, Springer-Verlag, 163, 99-123
- Rebmann, C: Kohlendioxid-, Wasserdampf- und Energieaustausch eines Fichtenwaldes in Mittelgebirgslage in Nordostbayern, Bayreuther Forum Ökologie, 106, 1-140 (2004)
- Rebmann, C; Subke, J-A; Foken, T (2001): CO<sub>2</sub>-Flüsse: Bestandesebene und Bodenatmung, Bayreuther Forum Ökologie, 90, 85-90
- Thomas, C; Foken, T (2002): Re-evaluation of integral turbulence characteristics and their parameterisations. 15<sup>th</sup> Conference on Turbulence and Boundary Layers, Wageningen, NL, 15-19 July 2002, Am. Meteorol. Soc., 129-132
- Thomas, C; Wichura, B; Foken, T (2001): Integrale Turbulenzcharakteristiken - ein Überblick, Österr. Beitr. Meteorol. & Geophys.(Extended Abstract and pdf-file on CD), 27, 223
- Thomas, C. et al. (2004): Documentation of the WALDATEM-2003 Experiment, Arbeitsergebnisse, Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie. Print, ISSN 1614-8916. 24.
- Wichura, B; Ruppert, J; Delany, AC; Buchmann, N; Foken, T (2004): Structure of carbon dioxide exchange processes above a spruce forest in Matzner, E.: Ecological Studies, Biogeochemistry of forested catchments in a changing environment: a German case study, Springer Verlag, 172, 161-176

## 4.3 Vorträge, Sonstiges

- Foken, T., 2004. 50 years of the Monin-Obukhov similarity theory, 16th Symposium on Boundary Layers and Turbulence, Portland, ME, USA.
- Foken, T., Thomas, C., Ruppert, J., Lüers, J. and Göckede, M., (2004): Turbulent exchange processes in and above tall vegetation, 16th Symposium on Boundary Layers and Turbulence. American Meteorological Society, Portland, ME, USA.
- Lüers, J., Thomas, C., Ruppert, J. and Foken, T. (2004): Wind, Lufttemperatur und Kohlendioxidprofile in einem Fichtenforst während des WALDATEM-2003 Sommerexperimentes, Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologen-Tagung, Karlsruhe, Germany, pp. (Extended Abstract and pdf-file on CD).

Ruppert, J., Thomas, C., Foken, T. (2004): CO<sub>2</sub>- und <sup>13</sup>C-Isotopenfluss für die Untersuchung der Dynamik des CO<sub>2</sub> Austausches zwischen Ökosystem und Atmosphäre, Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologen-Tagung, Karlsruhe, Germany, pp. (Extended Abstract and pdf-file on CD).

Thomas, C. and Foken, T. (2004): Dynamical characteristics of coherent structures over spruce forest using wavelet analysis, 1st General Assembly. European Geosciences Union, Nice, France.

Wichura, B; Ruppert, J; Delany, AC; Buchmann, N; Foken, T (2004): Structure of carbon dioxide exchange processes above a spruce forest in Matzner, E.: Ecological Studies, Biogeochemistry of forested catchments in a changing environment: a German case study, Springer Verlag, 172, 161-176

#### 4.4. Poster auf Tagungen 2001-2004

Foken, T., Thomas, C., Ruppert, J., Lüers, J. and Göckede, M., (2004): Turbulent exchange processes in and above tall vegetation, 26th Conference on Agricultural and Forest Meteorology. American Meteorological Society, Vancouver, British Columbia, Canada.

Foken, T ; Mauder, M; Göckede, M (2004) The CarboEurope-IP QA/QC Programme for Eddy Covariance Data, The FLUXNET 2004 Open Workshop, Florence : 13. 12. 2004 - 15. 12. 2004

Foken, T ; Thomas, C; Lüers, J; Ruppert, J; Göckede, M (2004) Turbulent Exchange Processes in and Above Tall Vegetation, The FLUXNET 2004 Open Workshop, Florence : 13. 12. 2004 - 15. 12. 2004

Foken, T \*; Anthoni, P; Göckede, M; Lüers, J; Rebmann, C; Ruppert, J; Thomas, C; Wichura, B (2004) Carbon Budget of a Spruce Forest Ecosystem, The Weidenbrunnen Site at 775 m a.s.l, 1997–2003, , The FLUXNET 2004 Open Workshop, Florence : 13. 12. 2004 - 15. 12. 2004

Lüers, J., Thomas, C., Ruppert, J., Bertolini, T. and Foken, T., 2004. Wind, air temperature and carbon dioxide profiles of a tall spruce forest during WALDATEM summer experiment 2003, 1st General Assembly, Nice, France.

Mauder, M; Foken, T (2001): Ergebnisse verschiedener Turbulenzmessgerätevergleiche, Österr. Beitr. Meteorol. & Geophys.(Extended Abstract and pdf-file on CD), 27, 216

Mayer, J.-C., Thomas, C. and Foken, T. (2004): Dynamik des Wind- und Temperaturprofils an einem Mittelgebirgsstandort mittels Sodar-Rass, Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologen-Tagung, Karlsruhe, Germany, pp. (Extended Abstract and pdf-file on CD).

Ruppert, J; Mauder, M; Lüers, J; Foken, T (2004) A New Gap Filling Approach For Eddy Covariance Data, The FLUXNET 2004 Open Workshop, Florence : 13. 12. 2004 - 15. 12. 2004

Thomas, C; Wichura, B; Foken, T (2001): Integrale Turbulenzcharakteristiken - ein Überblick, Österr. Beitr. Meteorol. & Geophys.(Extended Abstract and pdf-file on CD), 27, 223

Thomas, C; Foken, T (2002): Re-evaluation of integral turbulence characteristics and their parameterisations. 15<sup>th</sup> Conference on Turbulence and Boundary Layers, Wageningen, NL, 15-19 July 2002, Am. Meteorol. Soc., 129-132

Thomas, C. and Foken, T. (2003): Long-term Study of Coherent Exchange over Spruce Forest Using Wavelet Analysis, EGS,EGU Joint Assembly, Nice, France.

Thomas, C. and Foken, T. (2004): Untersuchung dynamischer Eigenschaften kohärenter Strukturen über einem hohen Fichtenwaldmittels Wavelet-Analyse, Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologen-Tagung, Karlsruhe, Germany, pp. (Extended Abstract and pdf-file on CD).

Thomas, C., Mayer, J.-C., Meixner, F.X. and Foken, T. (2004): Detection of coherent structures in high frequent time series of a monostatic Sodar-Rass system, 12th International Symposium on Acoustic Remote Sensing, Addendum. British Antarctic Survey, Cambridge, UK, pp. 43-46.

Thomas, C., Ruppert, J., Lüers, J., Olesch, J., Bertolini, T., Mayer, J.-C., Schröter, J., Delany, A.C., Foken, Th. (2004): Komplexes Wald-Grenzschicht Experiment WALDATEM-2003, Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologen-Tagung, Karlsruhe, Germany, pp. (Extended Abstract and pdf-file on CD).

Wichura, B; Buchmann, N; Foken, T (2001): CO<sub>2</sub>-Austauschprozesse über einem Fichtenbestand anhand von <sup>13</sup>C und CO<sub>2</sub>-Flussmessungen und Waveletanalysen, Österr. Beitr. Meteorol. & Geophys.(Extended Abstract and pdf-file on CD), 27, 203

Wichura, B; Buchmann, N; Foken, T (2002): Carbon dioxide exchange characteristics above a spruce forest. 25th Symp. Agric. & Forest Meteor., Norfolk, May 20-24, 2002, Am. Meteorol. Soc., 63-64

#### 5. Zitierte Publikationen

Antonia, R.A., Browne, L.W.B., Bisset, D.K. and Fulachier, L., 1987. A description of the organized motion in the turbulent far wake of a cylinder at low Reynolds Number. J. Fluid. Mech., 184: 423-444.

Antonia, R.A. and Fulachier, L., 1989. Topology of a turbulent boundary layer with and without wall suction. J. Fluid. Mech., 198: 429-551.

Aubinet, M., Heinesch, B. and Yernaux, M., 2003. Horizontal and vertical CO<sub>2</sub> advection in a sloping forest. Boundary-Layer Meteorology, 108: 397-417.

- Baldocchi, D. et al., 2001. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82: 2415-2434.
- Berger, M., Dlugi, R. and Foken, T., 2004. Modelling the vegetation atmospheric exchange with transilient model. In: E. Matzner (Editor), *Biogeochemistry of forested catchments in a changing environment*. Ecological Studies. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 177-190.
- Bergström, H. and Höglström, U., 1989. Turbulent exchange above a pine forest. II. Organized structures. *Boundary-Layer Meteorol.*, 49: 231-263.
- Brunet, Y. and Irvine, M.R., 2000. The control of coherent eddies in vegetation canopies: streamwise structure spacing, canopy shear scale and atmospheric stability. *Boundary-Layer Meteorol.*, 94: 139-163.
- Businger, J.A. and Oncley, S.P., 1990. Flux Measurement with Conditional Sampling. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 7: 349-352.
- Collineau, S. and Brunet, Y., 1993a. Detection of turbulent coherent motions in a forest canopy. Part I: Wavelet analysis. *Boundary-Layer Meteorol.*, 65: 357-379.
- Collineau, S. and Brunet, Y., 1993b. Detection of turbulent coherent motions in a forest canopy. Part II: Time-scales and conditional averages. *Boundary-Layer Meteorol.*, 66: 49-73.
- Foken, T., 2003. *Angewandte Meteorologie, Mikrometeorologische Methoden*. Springer, Heidelberg, 289 pp.
- Foken, T. et al., 2004. Post-field data quality control. In: X. Lee, W.J. Massman and B. Law (Editors), *Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurement and Analysis*. Kluwer, Dordrecht, pp. 181-208.
- Gerstberger, P. (Editor), 2001. *Die BITÖK-Untersuchungsflächen im Fichtelgebirge und Steigerwald*. Bayreuther Forum Ökologie, 90, 193 pp.
- Gerstberger, P., Foken, T. and Kalbitz, K., 2004. The Lehstenbach and Steinkreuz catchments in NE Bavaria, Germany. In: E. Matzner (Editor), *Biogeochemistry of forested catchments in a changing environment*. Ecological Studies. Springer, Heidelberg, pp. 15-41.
- Göckede, M., Markkanen, T., Hasager, C. B., und Foken, T. (2005). Use of footprint modelling for the characterisation of complex measurement sites, *Boundary-Layer Meteorol.*, (submitted).
- Göckede, M., Rebmann, C., und Foken, T. (2004). A combination of quality assessment tools for eddy covariance measurements with footprint modelling for the characterisation of complex sites, *Agric. For. Meteorol.*, (in print).
- Grossmann, A., Kronland-Martinet, R. and Morlet, J., 1989. Reading and Understanding Continuous Wavelet Transforms. In: J.M. Combes, A. Grossmann and P. Tchamitchian (Editors), *Wavelets: Time-Frequency Methods and Phase Space*. Springer-Verlag, New York, pp. 2-20.
- Heinz, G., Handorf, D. and Foken, D., 1999. Strukturanalyse der atmosphärischen Turbulenz mittels Wavelet-Verfahren zur Bestimmung von Austauschprozessen über dem antarktischen Schelfeis. Universität Bayreuth, Abteilung Mikrometeorologie, Arbeitsergebnisse, 7: 1-65.
- Höglström, U., 1990. Analysis of turbulence structure in the surface layer with a modified similarity formulation for near neutral conditions. *Journal of Atmospheric Sciences*, 47: 1949-1972.
- Inclan, M.G., Forkel, R., Dlugi, R. and Stull, R.B., 1996. Application of transilient turbulent theory to study interactions between the atmospheric boundary layer and forest canopies. *Boundary-Layer Meteorology*, 79: 315-344.
- Johansson, C., Smedman, A., Höglström, U., Brasseur, J.G. and Khanna, S., 2001. Critical test of the Validity of Monin-Obukhov similarity during convective conditions. *J. Atm. Sci.*, 58: 1549-1566.
- Kumar, P. and Foufoula-Georgiou, E., 1994. Wavelet analysis in Geophysics: An Introduction. In: E. Foufoula-Georgiou and P. Kumar (Editors), *Wavelets in Geophysics. Wavelet analysis and its applications*. Academic Press, San Diego, pp. 1-43.
- Lee, X., 1998. On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 91: 39-49.
- Lloyd, J. et al., 1996. Vegetation Effects on the Iso-topic Composition of Atmospheric CO<sub>2</sub> at Local and Regional Scales: Theoretical Aspects and a Comparison Between Rain Forest in Amazonia and a Boreal Forest in Siberia. *Australian Journal of Plant Physiology*, 23: 371-399.
- Mangold, A., 1999. *Untersuchung der lokalen Einflüsse auf Turbulenzmessungen der Station Weidenbrunnen*. Dipl.-Arbeit Thesis, Univ. Bayreuth, Bayreuth, 175 pp.
- Marr, D. and Hildreth, E., 1980. Theory of Edge Detection. *Proc. R.Soc. Lond.*, 207: 187-217.
- Mauder, M. and Foken, T., 2004. Documentation and instruction manual of the eddy covariance software package TK2, Arbeitsergebnisse, Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie. Print, ISSN 1614-8916. 26.
- Panofsky, H.A., Tennekes, H., Lenschow, D.H. and Wyngaard, J.C., 1977. The characteristics of turbulent velocity components in the surface layer under convective conditions. *Boundary-Layer Meteorology*, 11: 355-361.
- Petenko, I.V., Argentini, S., Bolignano, A., Mastrantonio, G. and Viola, A., 2004. Time and horizontal scales of convective plumes at mid-latitudes. In: P. Anderson, S. Bradley and S. von Hunerbein (Editors), *12<sup>th</sup> International Symposium on Acoustic Remote Sensing*. British Antarctic Survey, Cambridge, UK.
- Raupach, M.R., Finnigan, J.J. and Brunet, Y., 1989. Coherent Eddies in Vegetation Canopies, 4<sup>th</sup> Australian Conference on Heat and Mass Transfer, Christchurch, NZ, pp. 75-90.
- Raupach, M.R., Finnigan, J.J. and Brunet, Y., 1996. Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: the mixing-layer analogy. *Boundary-Layer Meteorol.*, 78: 351-382.
- Rebmann, C., 2003. *Kohlendioxid-, Wasserdampf- und Energieaustausch eines Fichtenwaldes in Mittelgebirgslage*. Dissertation Thesis, Universität Bayreuth, Bayreuth, 149 pp.



Rebmann, C. et al., 2004. Carbon budget of a spruce forest ecosystem. In: E. Matzner (Editor), Biogeochemistry of forested catchments in a changing environment. Ecological Studies. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 143-160.

Rebmann, C., Göckede, M., Foken, T., Aubinet, M., Aurela, M., Berbigier, P., Bernhofer, C., Buchmann, N., Carrara, A., Cescatti, A., Ceulemans, R., Clement, R., Elbers, J. A., Granier, A., Grünwald, T., Guyon, D., Havráňková, K., Heinesch, B., Knohl, A., Laurila, T., Longdoz, B., Marcolla, B., Markkanen, T., Miglietta, F., Moncrieff, J. B., Montagnani, L., Moors, E., Nardino, M., Ourcival, J.-M., Rambal, S., Rannik, Ü., Rotenberg, E., Sedlak, P., Unterhuber, G., und Vesala, T. (2005). Quality analysis applied on eddy covariance measurements at complex forest sites using footprint modelling, *Theor. Appl. Climatol.*, (in print).

Schween, J.H., Zelger, M., Wichura, B., Foken, T. and Dlugi, R., 1997. Profiles and fluxes of micrometeorological parameters above and within the Mediterranean forest at Castelporziano. *Atmospheric Environ.*, 31: 185-197.

Seufert, G., 1997. BEMA: A European Commission project on biogenic emissions in the Mediterranean area. *Atmospheric Environment*, 31 (S1): 1-255.

Smedman, A.-S., 1991. Some turbulence characteristics in stable atmospheric boundary layer flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 48: 856- 868.

Stull, R.B., 1984. Transilient turbulence theorie, Part 1: The concept of eddy mixing across finite distances. *Journal Atmospheric Science*, 41: 3351-3367.

Tennekes, H., 1982. Similarity relations, scaling laws and spectral dynamics. In: F.T.M. Nieuwstadt and H. Van Dop (Editors), *Atmospheric turbulence and air pollution modelling*. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Boston, London, pp. 37- 68.

Thomas, C. and Foken, T., 2004a. Detection of Long-term Coherent Exchange over Spruce Forest Using Wavelet Analysis. *Theor. Appl. Climatol.*: (in print).

Thomas, C. and Foken, T., 2004b. Untersuchung dynamischer Eigenschaften kohärenter Strukturen über einem hohen Fichtenwaldmittels Wavelet-Analyse, Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologen-Tagung, Karlsruhe, Germany, pp. (Extended Abstract and pdf-file on CD).

Thomas, C., Mayer, J.-C., Meixner, F.X. and Foken, T., 2005. Analysis of low-frequency turbulence above tall vegetation using a Doppler sodar. *Boundary-Layer Meteorol.*: submit.

Thomas, C. et al., 2004. Documentation of the WALDATEM-2003 Experiment, Arbeitsergebnisse, Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie. Print, ISSN 1614-8916. 24.

Vickers, D. and Mahrt, L., 1997. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 14: 512-526.

Webb, E.K., Pearman, G.I. and Leuning, R., 1980. Correction of the flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society*, 106: 85-100.

Wichura, B., Buchmann, N. and Foken, T., 2001. CO<sub>2</sub>-Austauschprozesse über einem Fichtenbestand anhand von <sup>13</sup>C und CO<sub>2</sub>-Flussmessungen und Waveletanalysen. *Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik*, 27: (Extended abstract) 203.

Wichura, B., Ruppert, J., Delany, A.C., Buchmann, N. and Foken, T., 2004. Structure of carbon dioxide exchange processes above a spruce Forest. In: E. Matzner (Editor), *Biogeochemistry of forested catchments in a changing environment*. Ecological Studies. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 161-176.

Wilczak, J.M., Oncley, S.P. and Stage, S.A., 2001. Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorology*, 99: 127-150.

## 6. Danksagung

Besonderer Dank gilt dem Max-Planck-Institut für Chemie, Mainz, insbesondere Prof. Franz X. Meixner, für die Möglichkeit der Nutzung des SODAR-RASS Systems für den Zeitraum des Experimentes WALDATEM-2003.

# Messung turbulenter Flüsse von Kohlendioxid und stabilem Kohlenstoffisotop $^{13}\text{C}$ über Pflanzenbeständen mit Hilfe der Relaxed Eddy Accumulation Methode

Johannes Ruppert, Thomas Foken

**Weitere Mitarbeiter:** Christoph Thomas, Teresa Bertolini (2003), Nina Buchmann, Anthony C. Delany (2001, 2002), Johannes Lüers, Joel Schröter

## Zusammenfassung

Die Kenntnis der Austauschprozesse und die Bilanzierung der resultierenden Stoffflüsse von Kohlenstoff über Pflanzenbeständen schaffen wesentliche Voraussetzungen für das Verständnis der Interaktion Ökosystem-Atmosphäre. Im Projekt wurden Prozesse und Bilanzen sowohl für den Austausch von Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) als auch für das stabile Kohlenstoffisotop  $^{13}\text{C}$  über Pflanzenbeständen untersucht. Während der beiden Feldexperimente GRASATEM-2003 und WALDATEM-2003 wurden  $\text{CO}_2$ - und  $^{13}\text{C}$ -Flüsse zwischen Ökosystem und Atmosphäre mit Eddy Covariance (EC) und Relaxed Eddy Accumulation Messungen (REA) Methoden quantitativ erfasst. Am Standort Waldstein Weidenbrunnen zeigte Messungen mit einem  $\text{CO}_2$ -Vertikalprofilsystem eine zeitlich sehr variable Dynamik der  $\text{CO}_2$  Austauschprozesse mit Phasen der Kopplung und Entkopplung von Bestand und darüberliegender Atmosphäre. Die mit der EC und REA Methode auf Ökosystemskala ermittelten Flüsse erlauben die Bestimmung der aktuellen Isotopendiskriminierung des Gesamtökosystems ( $\Delta^{13}\text{C}$ ). Dabei ergab sich ein für C3- Ökosysteme typischer Wert. Auf der Grundlage der kontinuierlichen Messungen des  $\text{CO}_2$  Flusses am Standort Waldstein Weidenbrunnen (EC) wurde für das Jahr 2003 die Jahressumme des Netto-Ökosystemaustausch (NEE) für  $\text{CO}_2$  mit  $-42 \text{ mol m}^{-2}$  oder  $-503 \text{ g C m}^{-2}$  bestimmt. Dieser Wert liegt im Betrag erheblich höher als Werte, die für die Jahre 1997 bis 2001 bestimmt wurden.

## Summary

The knowledge of exchange processes and of the balance of carbon fluxes above different vegetation are prerequisites for the correct understanding of the ecosystem-atmosphere interaction. Processes and balances of carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) exchange as well as of the stable carbon isotope  $^{13}\text{C}$  were investigated in this project.  $\text{CO}_2$  and  $^{13}\text{C}$  fluxes were measured during the two field campaigns GRASATEM-2003 and WALDATEM-2003 using the eddy covariance (EC) and relaxed eddy accumulation (REA) method. A  $\text{CO}_2$  vertical profile measurement system showed high variability in the dynamic of the  $\text{CO}_2$  exchange processes which were attributed to coupling/decoupling of the canopy and the atmosphere above canopy.  $^{13}\text{C}$  Fluxes measured at the ecosystem scale using EC and REA allowed determination of the ecosystem isotope discrimination ( $\Delta^{13}\text{C}$ ). The resulting average value of 17.7 ‰ is typical for C3 ecosystems. Based on the  $\text{CO}_2$  flux continuously measured at Waldstein Weidenbrunnen the annual sum of net ecosystem exchange (NEE) was derived with  $-42 \text{ mol m}^{-2}$  or  $-503 \text{ g C m}^{-2}$ . The absolute number is significantly higher than the absolute values determined for the years 1997 to 2001.

## 1. Fragestellung und Ziele des Teilprojektes

1. Welchen saisonalen Verlauf weisen  $^{13}\text{C}$ -Flüsse und damit die Flüsse der Nettoassimilation (A) und Nettorespiration (R) über einem Waldbestand (Fichte) der gemäßigten Breiten in Höhenlagen oberhalb von 600 m ü. NN auf?
2. Wie groß ist der Einfluss von Randbedingungen der Physiologie (Photosynthese, Atmung) und des turbulenten Austauschs (Eigenschaften der Grenzfläche Ökosystem-Atmosphäre, Stabilität der Atmosphäre, kohärente Strukturen) im/über dem Ökosystem auf den tages- und jahreszeitlichen Verlauf der  $^{13}\text{C}$ -Flüsse?
3. Wann sind die Voraussetzungen der Durchmischung im Bestand und der Stationarität der  $\text{CO}_2$ -Mischungsverhältnisse und  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Isotopenverhältnisse nicht erfüllt?
  - a. Welche Fehler ergeben sich für die Berechnung der Flüsse von Nettoassimilation (A) und Nettorespiration (R)?
  - b. Lassen entsprechende Fehler sich anhand einfacher Parameter abschätzen und ggf. korrigieren?
  - c. Welche weiteren methodischen Fehlerquellen sind zu berücksichtigen.
4. Lassen sich die Flüsse A und R anhand von Profilmessungen im Bestand der  $\text{CO}_2$ -Mischungsverhältnisse und  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ -Isotopenverhältnisse in weitere Teilkomponenten im Ökosystem aufteilen? Lässt die Integration der Teilkomponenten aus verschiedenen Messverfahren unter Beachtung der mikrometeorologischen Randbedingungen eine Schließung des Netto- $\text{CO}_2$ -Austauschs für das Ökosystem zu?

## 2. Methoden

Die Messung der  $^{13}\text{C}$ -Isotopenflüsse im Kohlenstoffaustausch zwischen Ökosystemen und der Atmosphäre setzt eine hochgenaue Analyse der mit Relaxed Eddy Accumulation (REA) gesammelten Luftproben voraus. Eine neue Bewertung der zu erwartenden Genauigkeit ergab, dass die im Vorläuferprojekt vorgeschlagene Methode zur Extraktion der Luftproben in Kältefallen und Glasröhrchen keine ausreichende Genauigkeit für die Isotopenflussbestimmung ergeben würde. Zusätzlich machte eine Veränderung in der Isotopenanalysetechnik es notwendig die Methode der REA Probenahme neu zu gestalten. Dazu wurde in Zusammenarbeit mit Mitarbeitern des Isotopenlabors des Max-Planck-Institutes (MPI) für Biogeochemie in Jena eine neue Probenahmetechnik konzipiert (siehe 7.1).

Der messtechnische Aufwand für die Bestimmung der  $^{13}\text{C}$ -Isotopenflüsse erfordert die Konzentration auf wenige Probenahmetage. Vor diesem Hintergrund musste die Experimentplanung und Fragestellung des Projektes angepasst werden. Vor dem Einsatz des REA-Systems über einem Waldökosystem (WALDATEM-2003, siehe 7.3) standen dabei ein Testexperiment (GRASATEM-2002) und ein Experiment zur Validierung der Methode über einem Grasland Ökosystem (GRASATEM-2003, siehe 7.2), das aufgrund geringer Bestandeshöhe eine geringere Tendenz zur Entkopplung von atmosphärischen und pflanzenphysiologischen Prozessen zeigt und das die Sammlung repräsentativer Biomasseproben erlaubt.

Die Konzentration auf die oben beschriebenen Intensivmessphasen unter Sicherstellung qualitativ hochwertiger Ergebnisse erlaubt eine bessere Bewertung einzelner Tagesgänge im  $^{13}\text{C}$ -Isotopenfluss. Die Bewertung des Jahreszeitlichen Verlaufes der  $^{13}\text{C}$ -Flüsse (Fragestellung 1) ist nur mit erheblich größerem Aufwand sowohl bei der Probenahme im Feld als auch bei der Isotopenanalyse der Luftproben im Labor möglich.

Die Arbeiten Bowling et al. (2003), Bowling et al. (2001) und Lloyd et al. (1996) zeigen, dass für die Trennung von Assimilation (A) und Respiration (R) eine genaue Bestimmung der Isotopensignaturen dieser Einzelflüsse notwendig ist. Die Isotopensignatur der Respiration ( $\delta_r$ ) kann in der Nacht aus  $^{13}\text{C}$ -Profilmessungen mit der Keeling-Plot Methode bestimmt werden. Während des Tages ergeben sich durch geringe  $\text{CO}_2$ - und  $^{13}\text{C}$ -Isotopengradienten in und über dem Bestand große Unsicherheiten in der Bestimmung von  $\delta_r$ . Unter Annahme konstanter Respiationsprozesse mit einem einheitlichen Isotopenverhältnis in den Ausgangssubstanzen für die Respiration und wenn keine Widersprüche mit den Tagesmessungen entstehen, können die nächtlich gemessenen Werte für  $\delta_r$  auf den Tag übertragen werden. Die Isotopensignatur des Assimilationsflusses ( $\delta_A$ ) kann aus der Modellierung der Stomata Öffnung über einen Pennman-Montheith Ansatz indirekt abgeleitet werden (Bowling et al., 2001). Für das während GRASATEM-2003 untersuchtem Grasland Ökosystem konnte  $\delta_A$  aktuell aus der Isotopensignatur frischen Assimilats (Zucker) in Biomasseproben bestimmt werden, die kurz nach der Probenahme mit Mikrowellen bestrahlt wurden.

Diese Methode erlaubt die unabhängige Bestimmung der Teilflüsse Assimilation (A) und Respiration (R) (Wichura, 2005; Wichura et al., 2004). Die direkte unabhängige Bestimmung von  $\delta_A$  in hohen und heterogenen Pflanzenbeständen für die Ökosystemskala stellt ein bisher nicht gelöstes messtechnisches Problem dar für die Trennung von A und R.

## 2.1 Whole-air Relaxed Eddy Accumulation (REA) Probenahmesystem

Flüsse von Spurengasspezies ( $F_c = \overline{w'c'}$ ), für die keine Detektoren mit hoher zeitlicher Auflösung zur Verfügung stehen, können nur durch indirekte Methoden wie Relaxed Eddy Accumulation (REA) gemessen werden. Die zugrunde liegende Parametrisierung des Faktors  $b$  beruht auf der Annahme der skalaren Ähnlichkeit. Die Skalierung mit der Standardabweichung der vertikalen Windgeschwindigkeit  $\sigma_w$  wird aus der Fluss-Varianz Ähnlichkeit abgeleitet (Businger and Oncley, 1990).

$$F_c = \overline{w'c'} \approx b \cdot \sigma_w \cdot (\overline{c_{\uparrow}} - \overline{c_{\downarrow}}) \quad (1)$$

Bei der REA werden in Abhängigkeit vom Vorzeichen des Vertikalwindes Luftproben in aufwärts und abwärts bewegte Turbulenzelemente (Eddies) getrennt und in zwei Reservoirs gesammelt. Anschließend wird der Inhalt der beiden Reservoirs im Labor z.B. mit einem Massenspektrometer auf die  $\text{CO}_2$  Konzentration und ihren  $^{13}\text{C}$ -Isotopengehalt hin analysiert, so dass für jeden Skalar die Differenz  $\overline{c_{\uparrow}} - \overline{c_{\downarrow}}$  ermittelt werden kann. Für die Abschätzung der Genauigkeit von REA Messungen müssen sowohl die zugrunde liegenden Annahmen als auch Fehler in der Bestimmung der Differenz  $\overline{c_{\uparrow}} - \overline{c_{\downarrow}}$  betrachtet werden (Ruppert, 2002).

Bei der REA ist der Fluss proportional zu der ermittelten Differenz  $\overline{c_{\uparrow}} - \overline{c_{\downarrow}}$ . Relativ zu den absoluten Isotopenverhältnissen ist die Differenz der Isotopenverhältnisse sehr klein, so dass schon geringe Ungenauigkeiten in der Messung große Fehler verursachen. Erste Messungen am Standort Waldstein im Vorläuferprojekt ergaben Differenzen der  $^{13}\text{C}$ -Isotopenverhältnisse  $^{13}\text{C}_{\uparrow} - ^{13}\text{C}_{\downarrow} \leq 0.1 \text{ ‰}^1$  (Wichura et al., 2001). Für die Bestimmung des Isotopenaustausches muss die Differenz der Isotopenverhältnisse ausreichend genau ( $\leq 0.02 \text{ ‰}$ ) bestimmt werden.

<sup>1</sup> Als Ausdruck für Isotopenverhältnisse  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  wird die  $\delta$ -Notation verwendet.

Die Umstellung der Probenahme in der REA auf „whole air samples“ (unveränderte Luftproben) in 1 l Glasflaschen erlaubt eine Steigerung der Genauigkeit etwa um den Faktor zehn. Gleichzeitig reduziert sich der Arbeitsaufwand während der Probenahme und der Probenaufbereitung erheblich. Die REA Methode erfordert die Probenahme mit konstanten Flussraten. Diese können aufgrund von Druckschwankungen nicht sichergestellt werden, wenn Luftproben direkt in ein starres Volumen überführt werden. Um trotzdem mit „whole air samples“ arbeiten zu können, eignet sich ein Zwischenreservoir aus flexiblem Material (Bowling et al., 1998). Zum Einsatz kamen dabei Mylar® Folienballons, die wir gründlich auf ihre Eignung für die Luftprobenahme von Spurengasen bei hohen Genauigkeitsansprüchen getestet haben (siehe 8.2).

Das Whole-air REA System wurde unter Berücksichtigung Ergebnisse aus Test-Experiment GRASATEM-2002 angepasst (Abb. 1, Ruppert and Foken, 2003). Nach der Probenahme wird dabei die Luft aus dem Ballonzwischenreservoir mit einer Pumpe komprimiert und nach einer Trocknung mit Magnesiumperchlorat in die Probenflasche umgefüllt. Ein konstanter Überdruck von ca. 400 hPa im Abfüllsystem wird durch ein Überströmventil am Ausgang der Probenflasche gewährleistet. Auf diese Weise konnten Druckschwankungen an den Magnesiumperchlorat-Trockenfallen und damit verbundene Isotopenfraktionierungen bei der Adsorption/Desorption an den Oberflächen des Granulats ausgeschlossen werden. Separate Abfüllsysteme für den Ballon 1 und Ballon 2 beschleunigen den Probenahmeprozess und verringern die Gefahr einer nachträglichen unkontrollierbaren Kontamination während der Abfüllung. Systematische Fehler zwischen den beiden Teilen des Abfüllsystems (Ballon 1, Flasche 1 und Ballon 2, Flasche 2) wurden durch ausführliche Tests auf Kontaminationen vor dem Experiment (siehe 8.2), regelmäßiges Spülen mit getrockneter Umgebungsluft und den ständigen Wechsel der zwei Probenahmewege für die Sammlung von Updrafts und Downdrafts während des Experimentes sichergestellt.

Das gesamte REA System wie auch die Komponenten des Spurengasprofilsystems wurden vor dem Zusammenbau sehr sorgfältig gereinigt (Spülen mit hochreinen Lösungsmitteln, Hexan:Aceton 1:1 nanograd im Ultraschallbad, sofern möglich, und, für alle Glas- und Edelstahlkomponenten, anschließendes Glühen im Trockenofen).

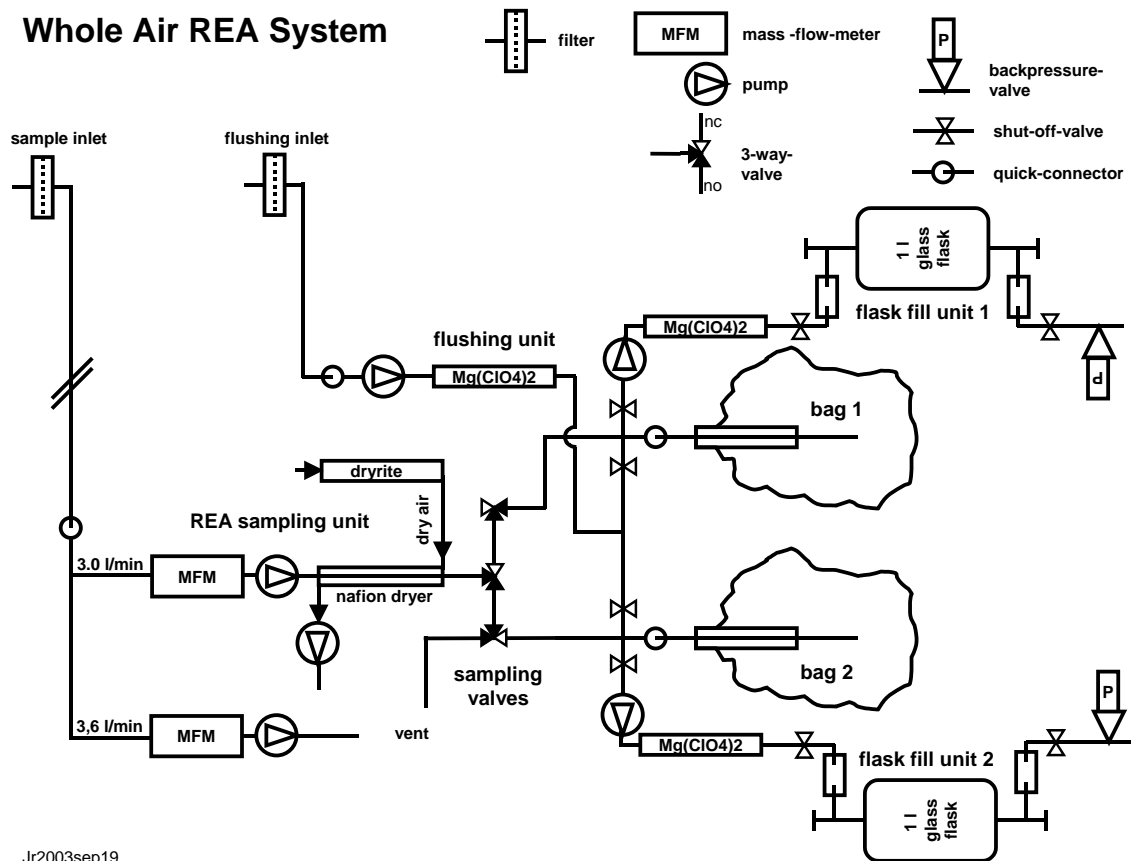
Die Steuerungssoftware ATEM (Atmospheric Turbulent Exchange Measurement) wurde für das neue REA Probenahmesystem angepasst und weiterentwickelt, um den routinemäßigen Einsatz während der Experimente GRASATEM-2003 und WALDATEM-2003 zu erleichtern und die Kompatibilität mit der Auswertesoftware TK2 (Mauder and Foken, 2004) zu gewährleisten.

---


$$\delta^{13}\text{C} = \left( \frac{{}^{13}\text{C} / {}^{12}\text{C}_{\text{PROBE}}}{{}^{13}\text{C} / {}^{12}\text{C}_{\text{STANDARD}}} - 1 \right) \cdot 1000\text{‰}$$

Der international verwendete Standard für  $^{13}\text{C}$  Isotopenverhältnisse ist Pee-Dee Belemnite (PDB). Hier angegebene  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte beziehen sich auf die Vienna-PDB-Skala (VPDB), (Werner, R.A. and Brand, W.A., 2001).

## Whole Air REA System



Jr2003sep19

**Abb. 1** Neues Design des Whole-air Relaxed Eddy Accumulation Systems.



**Abb. 2** Whole-air Relaxed Eddy Accumulation System während des Einsatzes im Experiment WALDATEM-2003. Als Zwischenreservoir für die Akkumulation der Luftproben dienen handelsübliche Mylar® Folienballons von Anagram International, Inc.

## 2.2 GRASATEM-2003 Experiment

Um die Messung von Isotopenflüsse mit der Relaxed Eddy Accumulation (REA) zunächst unter einfachen Bedingungen methodisch abzusichern wurde sie im Mai im Experiment GRASATEM-2003 (GRASland Atmospheric Turbulent Exchange Measurements) auf dem Grenzschichtmessfeld Falkenberg des Meteorologischen Observatoriums Lindenberg des Deutschen Wetterdienstes (DWD) über Grasland eingesetzt (Experimentdokumentation: Mauder et al., 2003).

## 2.3 WALDATEM-2003 Experiment

Das Experiment WALDATEM-2003 (WAvLet Detektion and Atmospheric Turbulent Exchange Measurements) auf der Versuchsfläche Waldstein/Weidenbrunnen in einem Fichtenbestand stellt das Hauptexperiment für das Projekt A7 in Zusammenarbeit mit dem Projekt A6 dar. In den Monaten Juni und Juli kamen dabei parallel das Whole-air REA-System für die Messung von Isotopen- ( $^{13}\text{C}$ - $\text{CO}_2$ ,  $^{18}\text{O}$ - $\text{CO}_2$ ) und Spurengasflüssen ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ), das Spurengas Profilsystem (Vertikalprofile) und das  $\text{CO}_2$  Profilsystem ‚Hydra‘ (National Center for Atmospheric Research, NCAR, Boulder, A.C. Delany) für die Messung horizontaler  $\text{CO}_2$  Gradienten zum Einsatz (Detaillierte Beschreibung des Experimentdesignes im Projektbericht A6 und Experimentdokumentation (Thomas et al., 2004).

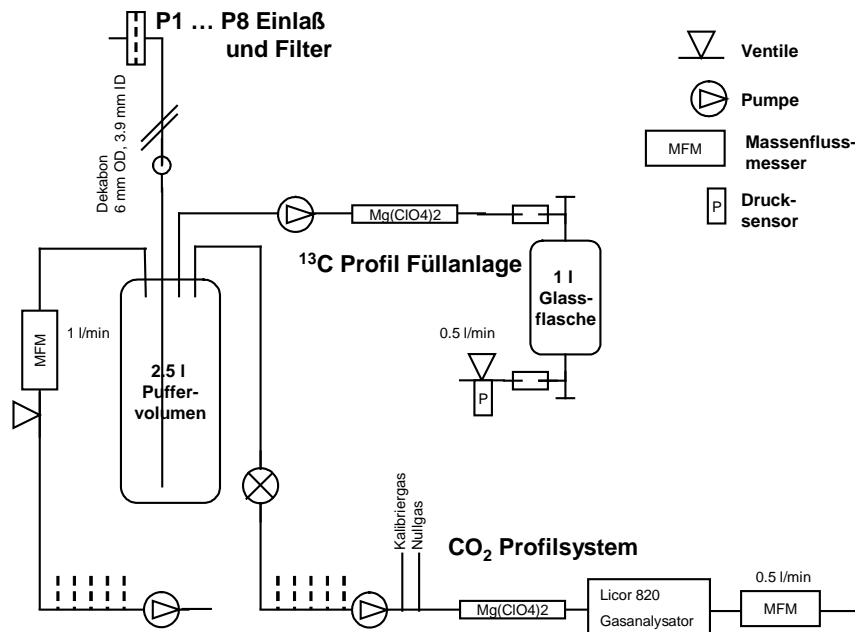
## 2.4 Profilsysteme – Spurengas Vertikalprofile und $\text{CO}_2$ -Horizontalprofile

Für die vollständige Bestimmung der  $\text{CO}_2$ -Bilanz und der lokalen Prozess im Bestand ist neben den Flussmessungen an der Bilanzfläche über dem Bestand ( $\overline{w'\rho'_c(h)}$  = Eddy Covariance der fluktuierenden Größen des Vertikalwindes  $w'$  und der Konzentration eines Skalars  $\rho'_c$ ) die Messung der mittleren (hier 10 min. und 30 min. Mittel) Konzentrationen im Bestand  $\overline{\rho_c}$  und deren zeitliche Veränderung  $\int_0^h \frac{\partial \rho_c}{\partial t} dz$  notwendig. Die advektiven Terme werden dann relevant, wenn verti-

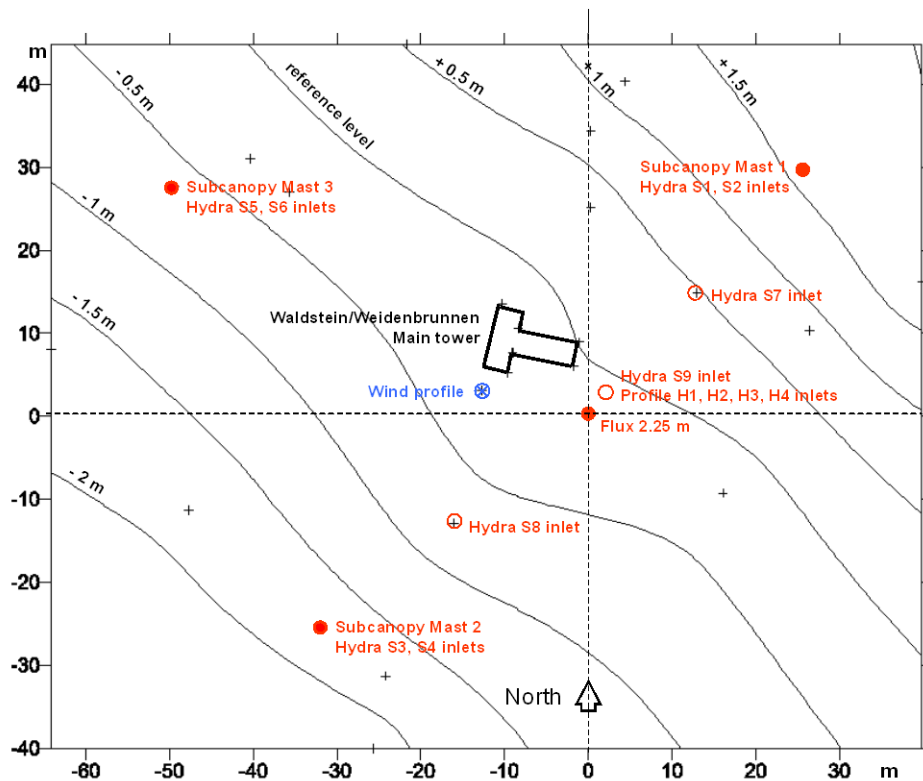
kale Windverhältnisse herrschen die im Mittel ( $\overline{w}$ ) ungleich null sind, und entlang dieser Richtung ein Konzentrationsgradient existiert oder bei gleich bleibender Konzentration durch horizontale Advektion ein Gradient im mittleren Vertikalwind herrscht. Zu ihrer Bestimmung müssen sowohl die vertikalen als auch horizontalen  $\text{CO}_2$  Gradienten im Bestand mit hoher Genauigkeit gemessen werden (Aubinet et al., 2000; Aubinet et al., 2003; Finnigan et al., 2003; Foken, 2003).

$$F_h = \overline{w'\rho'_c(h)} + \int_0^h \frac{\partial \rho_c}{\partial t} dz + \int_0^h \left( \overline{w} \frac{\partial \rho_c}{\partial z} + \overline{\rho_c} \frac{\partial \overline{w}}{\partial z} \right) dz \quad (2)$$

Das Spurengas Profilsystem (Vertikalprofil, Abb. 3) wurde mit einem Licor 820  $\text{CO}_2$ -Analysator ausgestattet. Neben der Analyse verschiedener Spurengasparameter im Labor aus den in Glasflaschen gesammelten Proben, ermöglicht das System somit eine kontinuierliche Messung der  $\text{CO}_2$ -Konzentration auf acht verschiedenen Messhöhen (Integration über 1 Minute auf jeder Messhöhe, d.h. Intervalle von ca. 8 min.). Die Messwerte unterliegen einer zusätzlichen zeitlichen Integration durch die Mischung in den Rohrzuleitungen bei laminarem Fluss (ca. 1.2 bis 1.5 l/min, 3.9 mm Innendurchmesser, ca. 20 bis 30 m Zuleitung, Reynolds-Zahl 450 - 550) und in einem Puffervolumen von 2.5 l. Für einen Mittelungszeitraum von 30 min. stehen somit 3 – 4 Messwerte zur Verfügung, die jeder für sich ca. 80 Einzelmessungen (2 Hz) einer Mischluft der entsprechenden Höhe repräsentieren.



**Abb. 3** CO<sub>2</sub>- und <sup>13</sup>C-Profilsystem. Einlass, Puffervolumen und <sup>13</sup>C Profil Füllanlage sind für jede Profilhöhe einmal vorgesehen.



**Abb. 4** Messanordnung des Advektionsexperimentes am Standort Waldstein/Weidenbrunnen während WALDATEM-2003



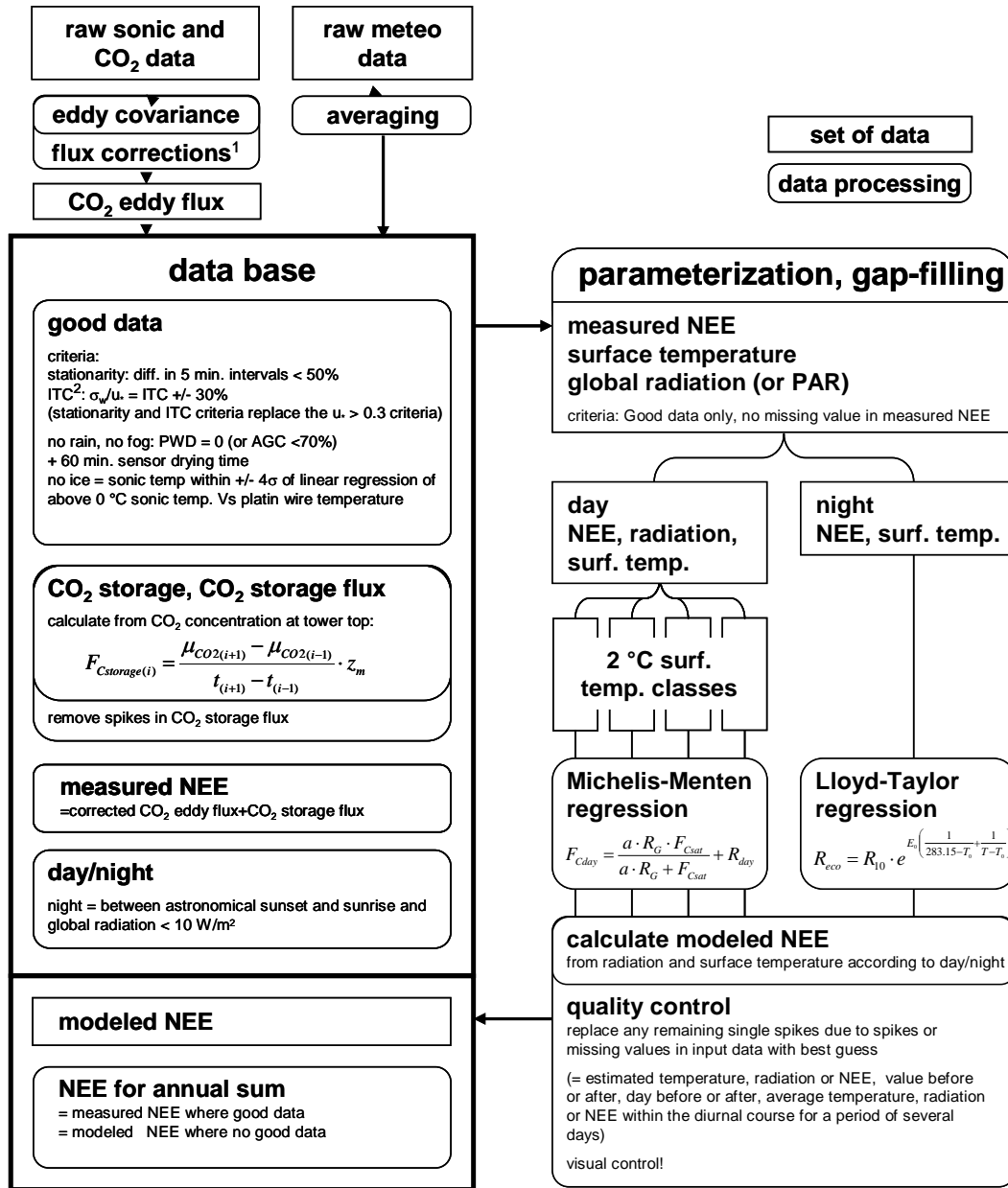
Durch Kooperation mit dem NCAR in Boulder, konnten wir während des WALDATEM-2003 Experimentes ein dort entwickeltes System zur Messung von Horizontalen  $\text{CO}_2$  Gradienten („Hydra“) einsetzen. Als Detektor wurde dabei ein Licor 7000  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$  Analysator eingesetzt. In ca. 50 m Abstand vom Hauptturm Weidenbrunnen wurden in nordöstlicher, südlicher und westlicher Richtung Bestandesmasten eingesetzt, an denen die  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen und Windgeschwindigkeiten auf 2 Höhen im Stammraum (1 m und 2.25 m) gemessen wurden. Um die horizontalen Gradienten abzusichern, wurde entlang der Hangneigung zwischen NE- und S-Mast zusätzlich an drei Punkten auf 2.25 m die  $\text{CO}_2$ -Konzentration gemessen (Abb. 4).

## **2.5 Steuerung und Kalibrierung der Profilsysteme**

Für die Steuerung und Datenerfassung beider oben beschriebener Profilsysteme wurden Hardware Schnittstellen und die Steuerungssoftware ATEM\_PROFIL und ATEM\_PROFIL\_HYDRA entwickelt. Die resultierenden Aufzeichnungen enthalten neben den gemessenen Daten der beiden  $\text{CO}_2$ -Analysatoren die gesamten Systemzustände und Steuerungsbefehle. Die Auswertungssoftware ATEM\_EVAL wurde mit einem speziellen Modul ausgestattet, das anschließend die automatische Zuordnung der kontinuierlich aufgezeichneten Daten zu den einzelnen Profileinlässen an verschiedenen Stellen im Ökosystem erlaubt.

Insbesondere die Messung von horizontalen  $\text{CO}_2$ -Gradienten erfordert eine sehr hohe Genauigkeit der Messung. Das „Hydra“ System (Horizontalprofile) wurde deshalb als „black box“ betrieben und mit einer Referenzgasflasche (REF) und drei Kalibriergasflaschen (CAL1, CAL2, CAL3) ausgestattet. Eine hochgenaue Messung der Spurengasparameter der dafür verwendeten Druckluftflaschen erfolgte im Gaslabor des MPI für Biogeochemie in Jena. Die Software ATEM\_PROFIL\_HYDRA wurde so gestaltet, dass das System neben den Messungen der Bestandesluft, in 2 Stunden Abständen die Kalibriergase misst. Aus dem Datensatz kann anschließend über eine multivariable Regression eine Kalibrierfunktion ermittelt werden, die auch störende Einflüsse von Temperatur-, Druck-, und Feuchteschwankungen im Freiland berücksichtigt. So kann eine höhere Genauigkeit erreicht werden, als dies mit üblichen Laborkalibrierungen möglich ist.

Eine Interkalibration der Vertikal und Horizontalprofilmessungen erfolgte über einen gemeinsamen Messpunkt und die Integration der Kalibriergasmessung in das Vertikalprofilsystem (Abb. 3).



**Abb. 5**

Schema der Auswertungsstrategie zur Erstellung der NEE Jahressumme 2003.

<sup>1</sup>Flux corrections should include: despiking, sensor time lag correction (maximum cross correlation), planar fit rotation, Moore correction, WPL Correction, iteration of all corrections.

<sup>2</sup> ITC (Integral Turbulence Characteristics) Criteria:

$$\frac{\sigma_w}{u_*} = \text{ITC} \pm 30\%$$

ITC parameterization according to Panofsky et al. (1977) and Thomas (2001); Thomas and Foken (2002). Values with  $z/L \leq -3$  or  $z/L \geq 0.4$  are rejected (=missing value for CO<sub>2</sub> eddy flux).  $z_+$  is defined as 1 m.  $f$  is the Coriolis parameter and  $u_*$  the friction velocity.

$$\text{ITC}(-3 < z/L < -0.2) = 1.3 \left( 1 - 2 \cdot \frac{z}{L} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad \text{ITC}(-0.2 < z/L < 0.4) = 0.21 \cdot \ln \left( \frac{z_+ \cdot f}{u_*} \right) + 3.1$$

## 2.6 Bestimmung der Jahressumme des CO<sub>2</sub> Nettoökosystemaustausch (NEE)

Die kontinuierlichen Messungen der turbulenten CO<sub>2</sub> Austausches mittels einer Eddy Covariance Systems am Standort Waldstein/Weidenbrunnen ermöglicht die Bestimmung des NEE (NEE Jahressummen 1997-2001 bei Rebmann et al., 2004; Rebmann et al., 2001). Die Auswertung der Turbulenzdaten erfolgte mit den Softwarepaketen EddySoft (Meteotools, Jena) und TK2 (Mauder and Foken, 2004). Die entsprechenden Ergebnisse wurden in einer Datenbank mit weiteren meteorologischen Messdaten zusammengeführt und weiterverarbeitet. Für die Ableitung einer Jahressumme des NEE müssen fehlende Daten oder Daten schlechter Qualität durch eine Parametrisierung ersetzt werden (Gap-filling, Falge et al., 2001). Eine umfassende Analyse und Diskussion unterschiedlicher Auswertungsmethoden für Daten vom Standort Waldstein/Weidenbrunnen findet sich bei Rebmann (2003). Die einzelnen Schritte für die Berechnung der Jahressumme 2003 und die zu Grunde liegende Parametrisierungen sind in Abb. 5 schematisch zusammengefasst. Beim Gap-Filling wurden aus NEE Werten guter Qualität am Tag für einzelne 2 °C Temperaturklassen die Parameter  $f_{csat}$ ,  $a$  und  $R_{day}$  für eine Michaelis-Menton Funktion über eine Least-Square Regression bestimmt (Schopfer et al., 1999). Nächtliche NEE Werte guter Qualität bilden die Grundlage für die Bestimmung von  $R_{10}$  und  $E_0$  für die von Lloyd and Taylor (1994) beschriebene exponentiellen Funktion mit  $T_0 = 227.13$  K, die die Abhängigkeit der Respiration von der Temperatur beschreibt. Dabei dienten Messungen der Globalstrahlung ( $R_g$ ) über dem Bestand und der Lufttemperatur in 2 m über Grund ( $T_{02}$ ) als

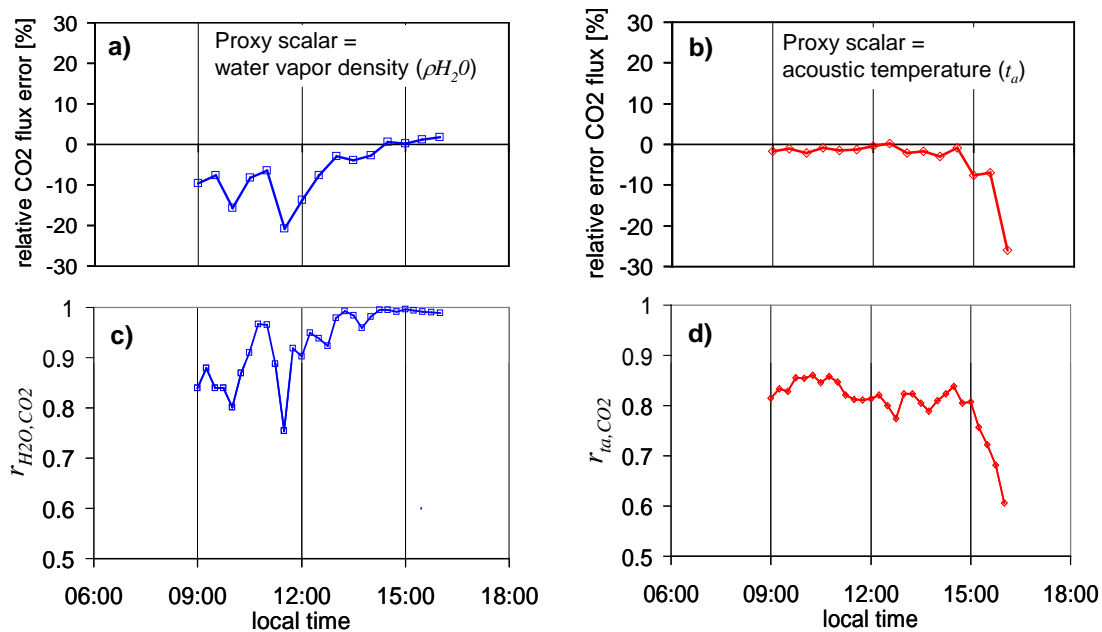
## 3. Ergebnisse

### 3.1 Fehleruntersuchung der REA Methode – Scalar Similarity

REA beruht auf der Annahme der skalaren Ähnlichkeit. In Simulationen der REA Methode mit hoch aufgelösten Daten des Vertikalwindes  $w$ , der akustischen Temperatur  $t_a$ , des Wasserdampfdichte  $\rho_{H_2O}$ , und der CO<sub>2</sub> Dichte  $\rho_{CO_2}$  wurde der relative Fehler der REA Methode in Bezug auf die EC Methode bestimmt. Dabei wurden unterschiedliche Skalare für die Bestimmung des  $b$ -Faktors herangezogen. Die sich mittels Simulation ergebenden methodischen Fehler für verschiedene Varianten der REA zeigen, dass Messungen mit hyperbolischer REA zu den Zeiten, in denen die Annahme skalarer Ähnlichkeit verletzt wird, mit großen Fehlern behaftet sind. Dabei verändert sich der Grad der Ähnlichkeit zwischen zwei Skalaren im Tagesverlauf (Abb. 6). Als Maß für die skalare Ähnlichkeit wurde die Skalar-Skalar Kreuzkorrelation herangezogen, z.B. für die Skalare akustische Temperatur ( $t_a$ ) und CO<sub>2</sub> Dichte ( $\rho_{CO_2}$ ):

$$r_{t_a, CO_2} = \frac{\overline{t_a' \cdot \rho_{CO_2}'}}{\sigma_{t_a} \cdot \sigma_{\rho_{CO_2}}} \quad (3)$$

Dabei bezeichnet  $'$  die Abweichung der Messgröße vom zeitlichen Mittel und  $\sigma$  die Standardabweichung der Messgröße. Die mittels Simulation bestimmten relativen Fehler der hyperbolischen REA und die Skalar-Skalar-Korrelationskoeffizienten zeigen einen parallelen Verlauf. Letztere können deshalb zur Abschätzung des Fehlers der REA Methode dienen werden.



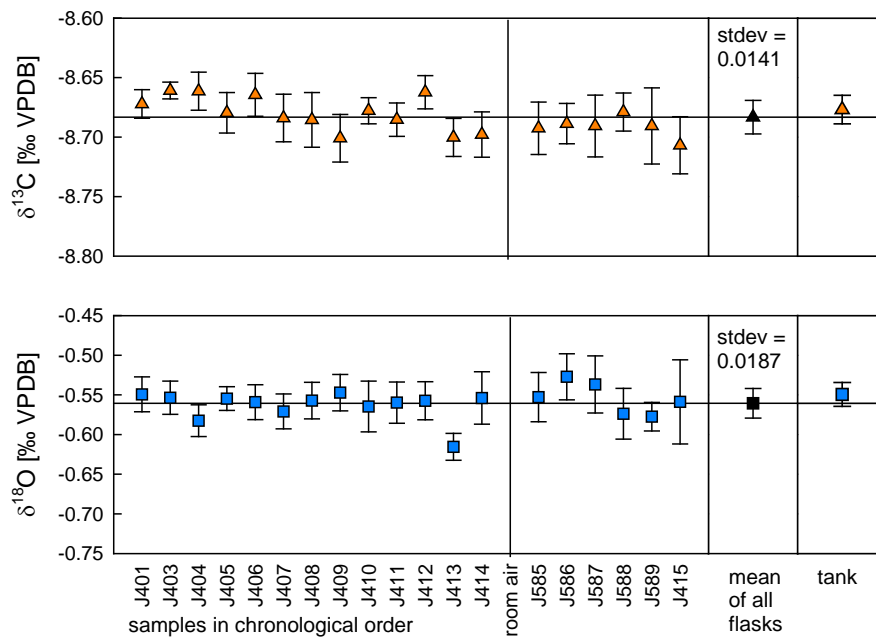
**Abb. 6** Simulierter Relativer Fehler bei der Bestimmung des CO<sub>2</sub> Flusses mit der hyperbolischen REA Methode unter Verwendung eines hyperbolischen Deadbands von  $H = 1.1$  und Wasserdampfdichte ( $\rho_{H_2O}$ ), (a) oder akustischer Temperatur ( $t_a$ ), (b) als Proxy-Skalar. In c) und d) sind die entsprechenden Skalar-Skalar Korrelationskoeffizienten dargestellt. Die geringere maximale Korrelation für  $r_{ta, CO_2}$  ergibt bedingt durch die Sensor bedingten unterschiedlichen Messvolumina einerseits des Ultraschallanemometers und des Open Path CO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>O Analysators.

Flussbestimmung von Skalaren, für die keine ausreichend schnellen Detektoren existieren und deren Flüsse deshalb mit REA Methoden gemessen werden müssen, ist eine derartige Simulation nicht möglich. Die hier beschriebene Methode kann in diesen Fällen lediglich Zeiten aufweisen, in denen nicht automatisch von skalarer Ähnlichkeit ausgegangen werden kann. Entscheidend für die Qualität der hyperbolischen REA Methode ist deshalb, dass ein Proxy-Skalar gefunden wird, für den sich Aufgrund theoretischer Überlegungen zur Austauschdynamik (z.B. die Gleichverteilung von Quellen und Senken im Ökosystem) eine große skalare Ähnlichkeit zur Zielgröße ergibt. Für die Bestimmung des <sup>13</sup>C Isotopenflusses mittels hyperbolischer REA wurde CO<sub>2</sub>, gemessen mit einem Open Path CO<sub>2</sub> H<sub>2</sub>O Analyzer (LI-7500, Licor Inc.) als Proxy-Skalar verwendet.

### 3.2 Tests und Freilandexperimente mit dem Whole-air REA Systems

Nach dem erfolgreichen Test der Folienballons aus Mylar® (Ruppert and Foken, 2003) wurde das gesamte „Whole-air“ REA System vor dem Experimentstart unter Vakuum auf Lecks geprüft. Der anschließende Test mit einem <sup>13</sup>C-Standard aus einem Drucklufttank zeigte keinerlei Anzeichen für Kontamination oder systematische Fehler. Die Standardabweichung der Proben (0.014 ‰, Abb. 7) war dabei nur geringfügig höher, als die typischerweise gefundene Messgenauigkeit für die Analysemethoden des Isotopenlabors am MPI für Biogeochemie in Jena (0.012 ‰, Werner

et al., 2001). Auch die Messung der  $^{18}\text{O}$ -Werte zeigen keine systematischen Fehler (Ruppert and Foken, 2003, vergleiche auch Bowling et al., 2003).

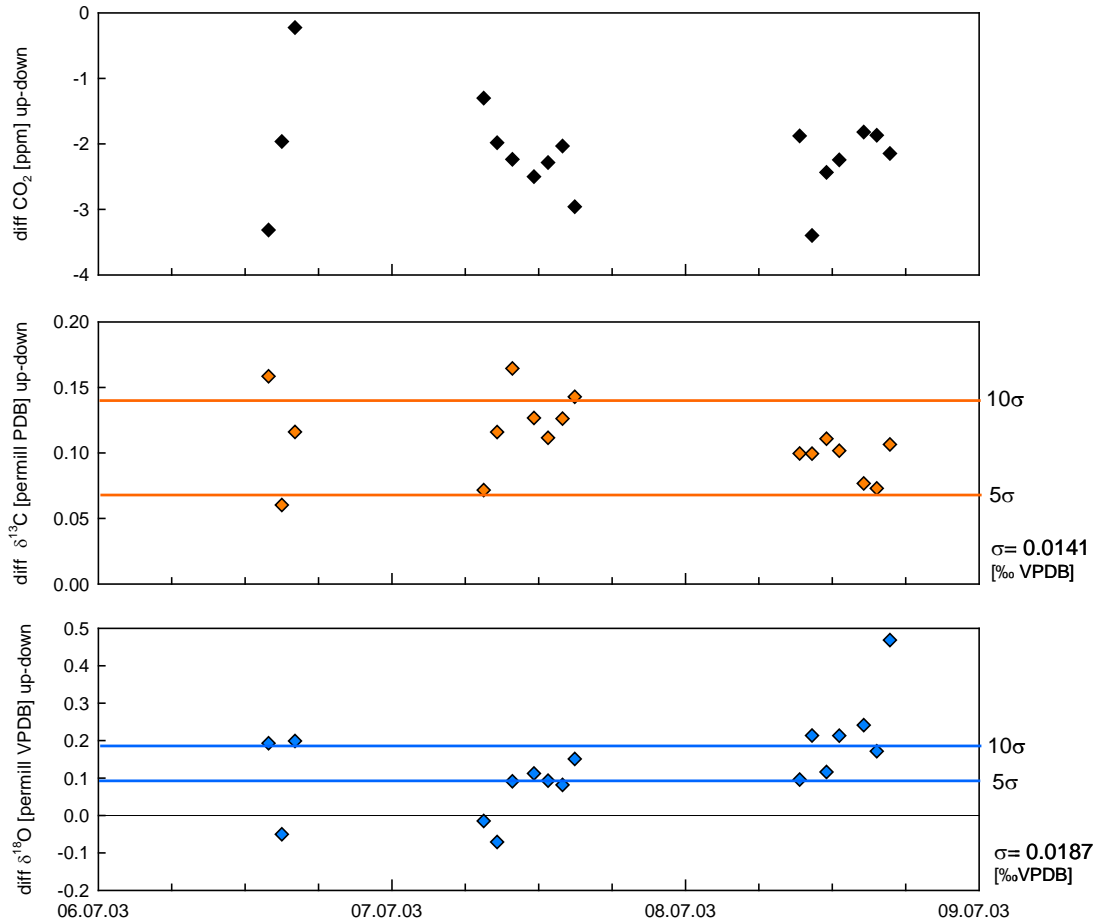


**Abb. 7** Qualitätstest des Whole-air REA Systems mit Mylar® Folienballons für die Messung von  $\delta^{13}\text{C}$  (▲) und  $\delta^{18}\text{O}$  (■) Isotopenverhältnissen. Mit Nummern gekennzeichnete Werte repräsentieren Einzelproben. Die korrespondierenden Fehlerbalken geben die Standardabweichung von bis zu 12 Wiederholungsmessungen an. Schwarze Symbole (▲, ■) und horizontale Linien repräsentieren den Mittelwert der Probengruppe. Die korrespondierenden Fehlerbalken und Werte geben die Standardabweichung innerhalb der Probengruppe an. Mit 'tank' bezeichnet ist eine Einzelprobe, die direkt aus der Gasflasche ohne Durchleitung durch das REA System befüllt wurde. Es zeigen sich sowohl für  $^{13}\text{C}$ - als auch  $^{18}\text{O}$ -Isotopenverhältnisse keinerlei systematische Fehler, auch nicht nachdem zwischenzeitlich das gesamte System mit Raumluft „kontaminiert“ wurde (Proben J585 – J415).

Im Test wurde exakt dieselbe Probenahme-prozedur verwendet, wie später im Freilandexperiment. D.h. vor jeder Probenahme wird das System dreimal mit der Standardluft (Labor) oder getrockneter Umgebungsluft aus der gleichen Probenahmehöhe (Freiland) vorgespült. Die Flaschen werden dadurch für die Dauer der Probenahme von 30 min. bei einem Überdruck von ca. 400 hPa konditioniert. Anschließend wird der Inhalt des Ballon-Zwischenreservoirs bis kurz vor Leerung des Ballons ebenfalls bei ca. 400 hPa Überdruck durch die Glasflasche gepumpt. Die Glasflasche wird somit nochmals mit Probe vorgespült, bevor der letzte Anteil der Probenluft für die spätere Laboranalyse in der Flasche verbleibt.

Ergebnisse aus den Experimenten GRASATEM-2003 und WALDATEM-2003 zeigen, dass bei Verwendung eines hyperbolischen Deadbands von  $H = 1.0$  bei der Probenahme mit dem REA System (Hyperbolic Relaxed Eddy Accumulation Method, HREA, Bowling et al., 1999) zwischen Updrafts und Downdrafts Isotopendifferenzen meistens im Bereich zwischen

0.07 ‰ und 0.14 ‰ liegen. Dies entspricht einem Verhältnis von Signal und Rauschen von etwa 5 bis 10 (Abb. 8).



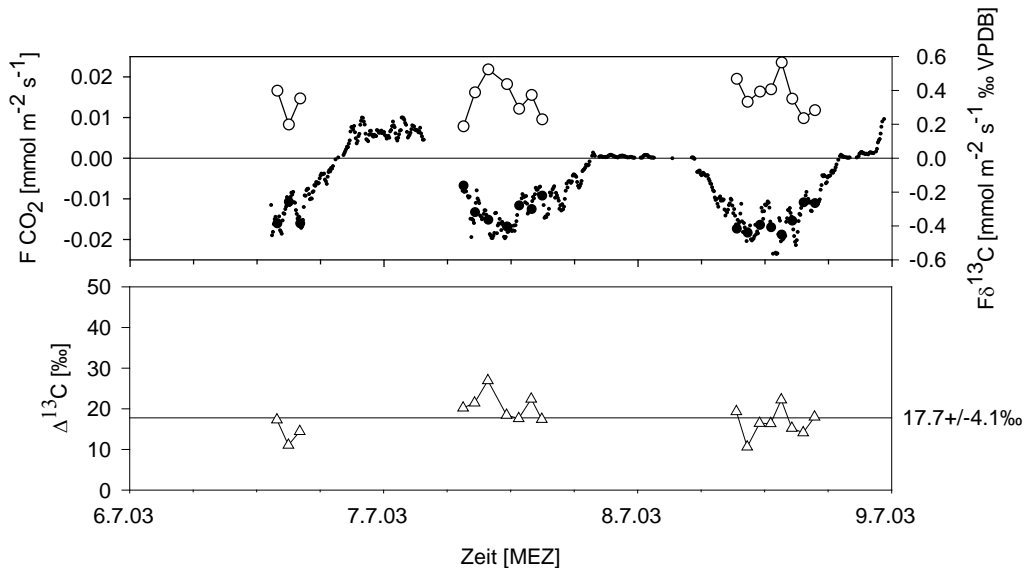
**Abb. 8** CO<sub>2</sub>- und <sup>13</sup>C-Isotopendifferenzen (Updrafts – Downdrafts) aus dem Relaxed Eddy Accumulation Sampling mit hyperbolischem Deadband (HREA,  $H=1.0$ ). Gezeigt sind drei exemplarische Messtage während des WALDATEM-2003 Experimentes am Standort Waldstein/Weidenbrunnen über Fichtenwald. Werte über der  $10\sigma$  bzw.  $5\sigma$  Linie ermöglichen die Bestimmung des Isotopenflusses mit einem geschätzten Fehler von 10 % bzw. 20%.

Neben der erreichten hohen Präzision in der Isotopenbestimmung bietet die „Whole-air“ REA Methode die Möglichkeit, verschiedene Spurengasparameter in der gleichen Probe zu bestimmen. Somit konnte CO<sub>2</sub>, das dem gleichen Probenahmeprozess unterworfen war und ebenfalls mit hoher Präzision in updrafts und downdrafts gemessen wurde, als Proxy Skalar für die Bestimmung des  $b$ -Faktors herangezogen werden.

$$b_{CO_2} = \frac{F_{CO_2}}{\sigma_w \cdot (c_{CO_2\uparrow} - c_{CO_2\downarrow})} \quad (4)$$

Durch Anwendung dieser Methode, können unvermeidliche kleine Fehler in der Zeitsynchronisation während des REA Probenahme Prozesses, die sich auf beide  $b$ -Faktoren (CO<sub>2</sub> und <sup>13</sup>C) gleichermaßen auswirken, bei der Bestimmung des Isotopenflusses ( $F\delta^{13}C$ ,  $F\delta^{18}O$ ) korrigiert werden.

Der  $\text{CO}_2$  Fluss ( $\text{FCO}_2$ ) wurde mit einem Eddy Covariance (EC) System mit  $\text{H}_2\text{O}$   $\text{CO}_2$  Open-Path Infrarot Gasanalysator (LI-7500, LiCor Inc.) bestimmt (Abb. 9).



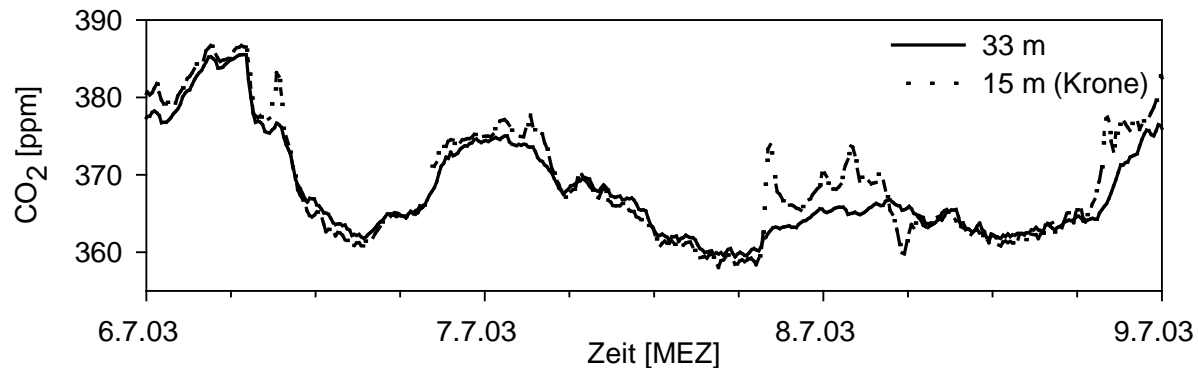
**Abb. 9**  $\text{CO}_2$ - und  $^{13}\text{C}$ -Isotopenflüsse ( $\text{FCO}_2$ ,  $\text{F}\delta^{13}\text{C}$ ) bestimmt mit der REA Methode aus Messungen über dem Fichtenbestand am Standort Waldstein/Weidenbrunnen. Aus der Differenz zwischen dem Verhältnis der beiden Isotopenflüsse ( $\text{F}\delta^{13}\text{C}/\text{FCO}_2$ ) und dem absoluten Isotopenverhältnis atmosphärischer Luft ergibt sich die aktuelle Isotopendiskriminierung des gesamt Ökosystems ( $\Delta^{13}\text{C}$ ).

Die mit der EC und REA Methode auf Ökosystemskala ermittelten Flüsse erlauben die Bestimmung der aktuellen Isotopendiskriminierung des Gesamtökosystems ( $\Delta^{13}\text{C}$ ). Für die in Abb. 9 dargestellten Messungen ergab sich dabei ein Mittelwert mit Standardabweichung von  $17.7 \text{ ‰} \pm 4.1 \text{ ‰}$ . Dieser Wert entspricht den Erwartungen für ein  $\text{C}_3$ -Waldökosystem. Buchmann and Kaplan (2001) geben Werte von  $16.4 \text{ ‰}$  bis  $18.9 \text{ ‰}$  für verschiedene Fichtenbestände an. Der größte  $^{13}\text{C}$ -Isotopenfluss und Spitzenwert für  $\Delta^{13}\text{C}$  fällt zeitlich in eine Periode mit großer Rate des  $\text{CO}_2$  Speicherabbaus in der Bestandesluft (siehe unten Abb. 10). Beide Tatsachen bestätigen, dass zu diesem Zeitpunkt in erhöhtem Maße internes Recycling von  $\text{CO}_2$  im Bestand stattfindet.

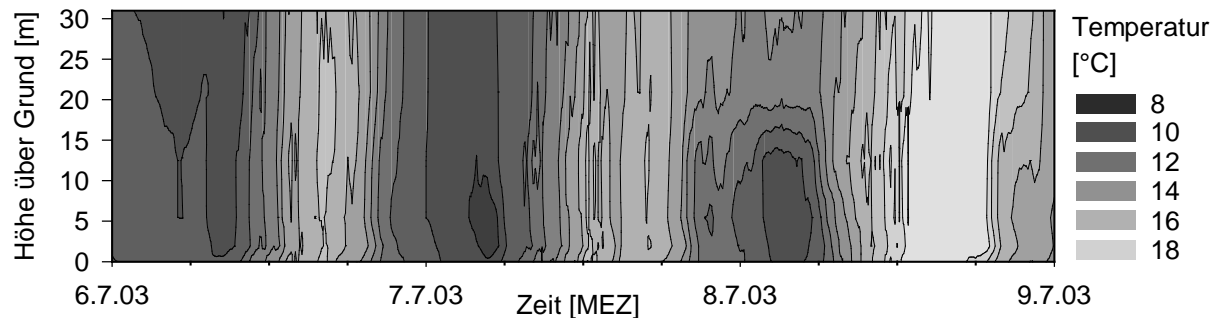
### 3.3 $\text{CO}_2$ -Vertikalprofilmessungen und Austauschdynamik im Bestand

Ergebnisse der  $\text{CO}_2$ -Vertikalprofilmessungen (0.03 m, 0.3 m, 1 m, 2.25 m, 5.5 m, 15.5 m, 22.5 m, 32.6 m, Bestandeshöhe = 19 m) zeigen eine starke zeitliche Dynamik mit sehr unterschiedlichem Verlauf an den einzelnen Messtagen (Abb. 10). In nächtlichen Zeiten mit geringer Kopplung der Bestandesluft an die Atmosphäre akkumuliert  $\text{CO}_2$  aus der Bodenrespiration im Bestand. An dem zeitlichen Verlauf der  $\text{CO}_2$  Mischungsverhältnisse beim einsetzen der Photosynthese (4:30 Uhr MEZ) zeigt sich am 7.7.2003 einerseits eine Situation mit guter Kopplung zwischen Kronenraum und darüber liegender Atmosphäre und andererseits am 8.7.2003 eine Situation mit extremer Entkopplung. Hierbei wird das  $\text{CO}_2$  Mischungsverhältnis im Kronenraum durch Photosynthese erniedrigt. Erst ab ca. 6 Uhr gleichen sich die Mischungsverhältnisse in und über dem Bestand durch langsam einsetzenden Austausch aneinander an. Dieses Phänomen wird auch aus den Messungen des nächtlichen turbulenten  $\text{CO}_2$ -Flusses über dem Bestand (Abb. 9) in der Nacht

vom 7.7. auf den 8.7. deutlich. Eine Betrachtung der vertikalen Lufttemperaturgradienten (Abb. 11) während der beiden Nächte zeigt, die Ursache für die Entkopplung in der zweiten Nacht mit einer stabilen Temperaturschichtung im Bestand (Stabilitätsparameter  $z/L = +0.4 \dots +1.2$ ,  $z$ : Höhe,  $L$ : Obukhov-Länge).



**Abb. 10** Dynamik der  $\text{CO}_2$ -Konzentration in und über dem Fichtenbestand am Waldstein/Weidenbrunnen im Verlauf zweier exemplarischer Tage des Experimentes WALDATEM 2003.



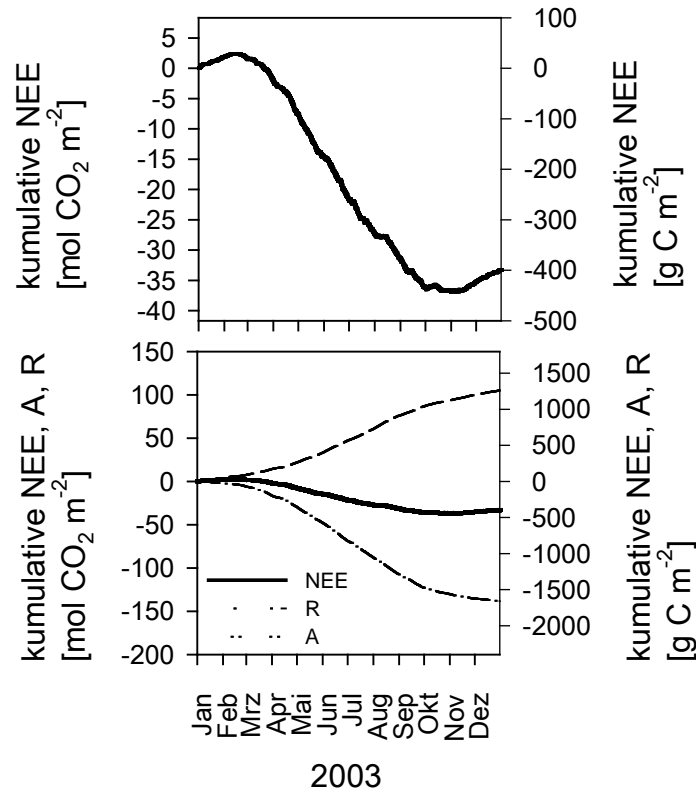
**Abb. 11** Profil der Lufttemperatur in und über dem Fichtenbestand.

### 3.4 $\text{CO}_2$ -Horizontalprofilmessungen und Advektion

Nächtliche Situationen mit stabiler Schichtung wie in 8.3 beschrieben sind geeignet, um in Hanglagen Kaltluftabflüsse im Bestand zu generieren, die einen advektiven Beitrag zur  $\text{CO}_2$  Bilanz darstellen können, wenn  $\text{CO}_2$ -Gradienten entlang der horizontalen mittleren Windrichtung existieren (Aubinet et al., 2003; Feigenwinter et al., 2004). Ein Hinweis auf diese Dynamik fand sich zunächst in einem sekundären Windmaximum im Stammraum des Bestandes. Die bisherige Auswertung des Advektionsexperimentes während WALDATEM-2003 ergab aber keine regelmäßig wiederkehrenden Situationen in denen  $\text{CO}_2$ -Gradienten entlang der Windrichtung einen systematischen horizontalen Ein- oder Austrag von  $\text{CO}_2$  in den Bestand darstellen wie an anderen Waldstandorten in Hanglage (Aubinet et al., 2003). Grund dafür könnte sein, dass die Struktur des Unterwuchses im Stammraum, insbesondere an Waldkanten und in der Umgebung von Löchern im Kronendach, ein freies Fließen kalter Luft entlang der Hangneigung unterbindet. Für die Jahresbilanz des  $\text{CO}_2$ -Austausches muss demnach zunächst kein erheblicher advektiver Einfluss erwartet werden. Dennoch hat das Experiment WALDATEM-2003 gezeigt, wie stark die Dyna-



mik des CO<sub>2</sub>-Austausches unter anderem durch Prozesse im Stammraum in einzelnen Situationen beeinflusst werden kann.



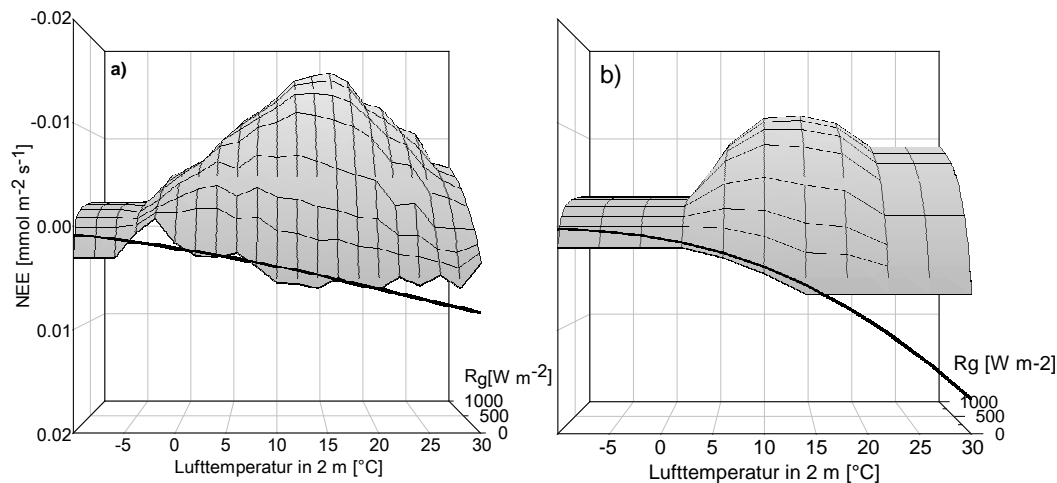
**Abb. 12** Kumulative Kohlenstoffflüsse im Jahr 2003 über dem Fichtenbestand Waldstein Weidenbrunnen. CO<sub>2</sub>-Netto-Ökosystemaustausch (NEE), Respiration (R) und Assimilation (A).

### 3.5 CO<sub>2</sub>-Netto-Ökosystemaustausch (NEE) Jahressumme 2003

Die Jahressumme 2003 des Netto-Ökosystemaustausch für CO<sub>2</sub> wurde mit -33.15 mol m<sup>-2</sup> oder -398 g C m<sup>-2</sup> berechnet. Dieser Wert liegt im Betrag erheblich höher als Werte, die für die Jahre 1997, 1998, 1999 und 2001 bestimmt wurden (Rebmann, 2003; Rebmann et al., 2004). Die intensive Suche nach möglichen Fehlerquellen ergab einen deutlichen Unterschied in den gemessenen Werten, der sich zum Teil auch in den Parametrisierungen niederschlägt (Abb. 13). Dabei zeigt sich, dass sowohl die maximal erreichten Assimilationsraten, als auch die Assimilation in kälteren Perioden (-5... +4 °C) deutlich höhere Werte zeigen, deren Aufsummierung den Unterschied in der Jahressumme hervorrufen. Die gemessenen Respirationswerte und Parametrisierungen führten trotz geringfügiger Unterschieden in der Methodik zu ähnlichen hohen Jahressummen der Respiration in den Jahren 1997, 1998, 1999, 2000, 2001 und 2003, so dass hierin keine erhebliche Ursache für den Unterschied gesehen wird.

Bei der Parametrisierung der Tagesmessungen des NEE aus der gemessenen Globalstrahlung wurden die besten Ergebnisse mit einer zusätzlichen 2 °C Temperaturklassifizierung der 2 m Lufttemperatur erreicht. Aus einem gleitenden Mittel der Lufttemperatur abgeleitete Saisonale Klassen (Winter, Frühling, Sommer, Herbst) erscheinen zwar aus pflanzenphysiologischen Gründen für die meisten Ökosysteme angebracht, zeigten aber für den immergrünen Fichtenbestand Waldstein Weidenbrunnen keine weitere wesentliche Verbesserung. Mit einer Abhängigkeit von

Strahlung und 2 °C Temperaturklassen kann bereits der größte Teil der Varianz im NEE (Bestimmtheitsmaße bis zu 0.74) erklärt werden. Hiermit steht ein effizientes leicht umsetzbares Verfahren für die Parametrisierung fehlender NEE Werte während des Tages zur Verfügung.



**Abb. 13** Funktionen für die Parametrisierung fehlender Daten in der Jahressumme des NEE a) für 2003, b) für 1999 (Rebmann, 2003; Rebmann et al., 2004). Dabei bedeuten negative NEE Werte (nach oben abgetragen) eine Aufnahme von CO<sub>2</sub> in das Ökosystem. Die dargestellten Flächen ergeben sich aus der Regression von Tageswerten des NEE und Strahlung als Sättigungskurven für jede einzelne 2 °C Temperaturklasse von -6 bis +30 °C. Die schwarze Kurve gibt die Exponentialfunktion einer Regression der nächtlichen NEE Werte mit der Lufttemperatur wider.

Auch für die Parametrisierung der nächtlichen NEE Werte ergaben saisonale Datenklassen keine wesentliche Steigerung der Bestimmtheitsmaße, so dass eine temperaturabhängige Funktion für das Jahr 2003 bestimmt wurde. Die Übertragung dieser Funktion auf die Tagessituation konnte eine grobe Abschätzung des Respirationsflusses (R) und daraus abgeleitet des Assimilaionsflusses (A) liefern (Abb. 12)

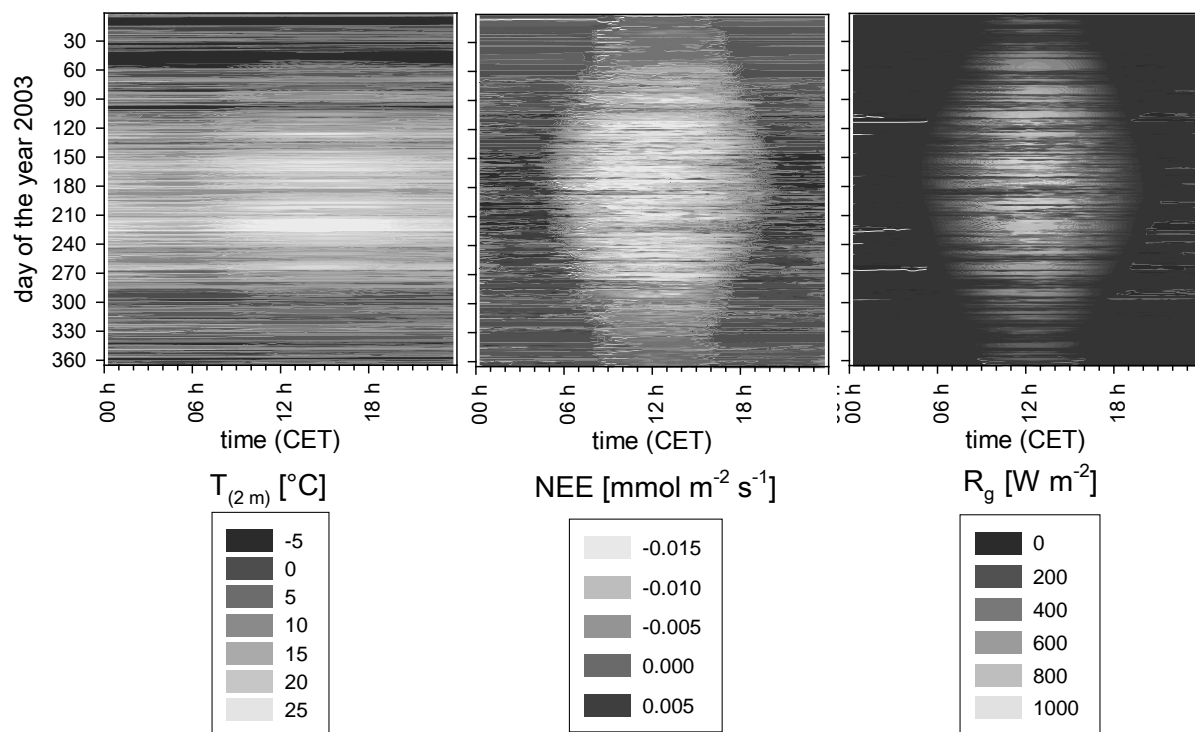
Als Erklärung für die beobachteten Unterschiede kommen folgende Punkte vorläufig in Frage:

1. Klimatisch gesehen extreme Verteilung und Werte von Strahlung und Temperatur in dem Jahr 2003 (Siehe Projektbericht A3). Hui et al. (2003) zeigen exemplarisch anhand von Messungen im Duke Forest, dass 60% der interanuellen Variabilität der NEE durch saisonale Klimavariabilität erklärt werden kann.
2. Verzögerte Auswirkung einer Kalkung und Magnesiumdüngung des Bestandes im Sommer 2000.
3. Hohe Schneelasten in den Wintern vor 2003 haben an mehreren Stellen Kronenbruch und damit eine Auflockerung des Bestandes verursacht. Des Weiteren sind einige stark geschädigte Bäume im Bestand ganz abgestorben. Dieser beobachtete „self-thinning“ Effekt kann langfristig dazu führen, dass mehr Licht in den Bestand eindringt und mehr Nährstoffe für die Verbleibende Vegetation, insbesondere den Unterwuchs zur Verfügung stehen.
4. Im Jahr 2002 fand ein Gerätewechsel im Eddy Covariance System statt. Dabei wurde ein Closed-Path Infrarot-Gasanalysator (IRGA, LI-6262) durch einen Open-Path IRGA (LI-7500, LiCor Inc.) ersetzt. Bei Vergleichen der unterschiedlichen Geräte werden in der Literatur immer wieder gewisse Diskrepanzen der beiden Analysemethoden für die Flussbestimmung festgestellt. Diese sollten bei den hier eingesetzten Geräten aber nicht so groß sein, dass sie für den großen Unterschied in den NEE Jahressummen vor und nach 2002 verantwortlich sein könnten (Ham and Heilman, 2003; Leuning and Judd, 1996; Suyker and Verma, 1993).

Insbesondere für die Klärung ob einer oder mehrere der Punkte 1-3 ausschlaggebend für die gemessenen Unterschiede in den Assimilationsraten sind, ist die weitere Beobachtung des Ökosystems erforderlich. Eine sinnvolle Auswertung für 2004 kann aber erst nach Abschluss des Jahres mit einem vollständigen Datensatz durchgeführt werden.

In einem Hofmüller-Plot des NEE, der Lufttemperatur und der Globalstrahlung (Abb. 14) können Prozesse auf unterschiedlichen zeitlichen Skalen (Tagesgang, Jahresgang) identifiziert werden. Dabei fallen für 2003 Tageszeiten im Februar mit hohen Werten der Globalstrahlung auf. Da für diesen Winterzeitraum keine NEE Daten guter Qualität Verfügbar waren, ergeben sich die zugehörigen NEE Werte aus der Modellierung.

Gestützt durch ausreichend viele NEE-Messdaten guter Qualität werden Anfang Juni und Anfang August 2003 Perioden mit sehr hohen Temperaturen sichtbar. Zu diesen Zeiten ist die CO<sub>2</sub>-Assimilation in den Nachmittagsstunden deutlich reduziert, was auf ein frühzeitiges Schließen der Stomata an diesen Tagen aufgrund des Trocken- und Hitzestresses schließen lässt. Insgesamt gesehen scheint das außergewöhnlich warme und strahlungsreiche Jahr 2003 aber im untersuchten Fichtenbestand Waldstein/Weidenbrunnen mit hohen Photosyntheseraten verbunden zu sein.



**Abb. 14** Hofmüller Plots der Lufttemperatur in 2 m Höhe ( $T_{2\text{ m}}$ ), des Netto Ökosystem-austausches (NEE) und der Globalstrahlung ( $R_g$ ) im Jahr 2003.

## 4. Veröffentlichungen

### 4.1 Publikationen in Zeitschriften mit Review-System

- Reth, S; Göckede, M; Falge, E: CO<sub>2</sub> efflux from agricultural soils in Eastern Germany - comparison of a closed chamber system with eddy covariance measurements, Theoretical and Applied Climatology, accepted (2005)
- Knohl, A; Kolle, O; Minayeva, T; Miljukova, IM; Vygodskaya, NN; Foken, T; Schulze, E-D: Carbon dioxide exchange of a Russian boreal forest after disturbance by wind throw, Global Change Biology, 8, 231-246 (2002)
- Fabian, P; Winterhalter, M; Rap, H; Stohl, A; Schlager, H; Foken, T; Wichura, B; Berresheim, H; Häberle, KH; Kartschall, T: The BaySoFi campaign - Measurements carried out during the total solar eclipse of August 11, 1999, Meteorol. Zeitschrift, 10, 165-170 (2001)
- Foken, T; Wichura, B; Klemm, O; Gerchau, J; Winterhalter, M; Weidinger, T: Micrometeorological conditions during the total solar eclipse of August 11, 1999, Meteorol. Zeitschrift, 10, 171-178 (2001)

### 4.2 Sonstige Publikationen

- Aubinet, M; Clement, R; Elbers, JA; Foken, T; Grelle, A; Ibrom, A; Moncrieff, JB; Pilegaard, K; Rannik, Ü; Rebmann, C: Metodology for data acquisition, storage and treatment in Valentini, R: Fluxes of Carbon, Water and Energy of European Forests, Ecological Studies, Springer-Verlag, 163, 9-35 (2003)
- Culf, AD., Foken, T., Gash, JHC. (2003). The energy balance closure problem, in Kabat et al.: Vegetation, water, humans and the climate. A new perspective on an interactive system. Springer, Berlin, 159-166.
- Bernhofer, C; Aubinet, M; Clement, R; Grelle, A; Grünwald, T; Ibrom, A; Jarvis, P; Rebmann, C; Schulze, E-D; Tenhunen, JD: Spruce Forests (Norway and Sitka spruce, including Douglas fire): Carbon and water fluxes and balances, ecological and ecophysiological determinants in Valentini, R: Fluxes of Carbon, Water and Energy of European Forests, Ecological Studies, Springer-Verlag, 163, 99-123 (2003)
- Foken, T: Untersuchungen zum Klima im Waldsteingebiet, Bayreuther Forum Ökologie, 90, 59-63 (2001)
- Foken, T: (Hrsg.): Lufthygienisch-Bioklimatische Kennzeichnung des oberen Egertales, Bayreuther Forum Ökologie, 100, 69+XLVIII (2003)
- Foken, T (2003). Angewandte Meteorologie, Mikrometeorologische Methoden, Springer, Heidelberg, Berlin, 289 S., (S. 112 ff)
- Foken, T: Climate change in the Lehstenbach region in Matzner, E.: Ecological Studies, Biogeochemistry of forested catchments in a changing environment: a german case study, Springer Verlag, 172, 59-66 (2004)
- Foken, T; Göckede, M; Mauder, M; Mahrt, L; Amiro, BD; Munger, JW: Post-field data quality control. in Lee X., Massman W, Law B : Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurement and Analysis, Kluwer, Dordrecht, 181-208 (2004)
- Foken, T; Kartschall, T; Badeck, F; Waloszczyk, K; Wichura, B; Gerchau, J: Reaktionszeiten im System Atmosphäre-Pflanze, gemessen während der totalen Sonnenfinsternis in Süddeutschland am 11. August 1999, Österr. Beitr. Meteorol. & Geophys.(Extended Abstract and pdf-file on CD), 27, 208 (2001)
- Mauder, M., Foken, T., Göckede, M., Liebethal, C., Ruppert, J. and Bertolini, T., 2003. Dokumentation des Experimentes LITFASS-2003, 19.5.-20.6.2003, Dokumentation des Experimentes GRASATEM-2003, 14.5.-1.6.2003. Arbeitsergebnisse 23, Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie. Print, ISSN 1614-8916.
- Mauder, M. and Foken, T., 2004. Documentation and instruction manual of the eddy covariance software package TK2. Arbeitsergebnisse 26, Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie. Print, ISSN 1614-8916.
- Rebmann, C: Kohlendioxid-, Wasserdampf- und Energieaustausch eines Fichtenwaldes in Mittelgebirgslage in Nordostbayern, Bayreuther Forum Ökologie, 106, 1-140 (2004)
- Rebmann, C; Anthoni, P; Falge, E; Göckede, M; Mangold, A; Subke, J-A; Thomas, C; Wichura, B; Schulze, E-D; Tenhunen, JD; Foken, T: Carbon budget of a spruce forest ecosystem in Matzner, E.: Ecological Studies, Biogeochemistry of forested catchments in a changing environment: a german case study, Springer Verlag, 172, 143-160 (2004)
- Rebmann, C; Subke, J-A; Foken, T: CO<sub>2</sub>-Flüsse: Bestandesebene und Bodenatmung, Bayreuther Forum Ökologie, 90, 85-90 (2001)
- Ruppert, J., 2002. Eddy Sampling Methods for the Measurement of Trace Gas Fluxes. Diploma Thesis, University of Bayreuth, Bayreuth, 95 pp.
- Ruppert, J; Wichura, B; Delany, AC; Foken, T: Methoden zur Messung turbulenter Spurengasflüsse im Vergleich, Österr. Beitr. Meteorol. & Geophys.(Extended Abstract and pdf-file on CD), 27, 220 (2001)
- Ruppert, J., Wichura, B., Delany, A.C. and Foken, T., 2002. Eddy Sampling Methods, a comparison using simulation results, 15th Symposium on Boundary Layers and Turbulence. American Meteorological Society, Wageningen, Netherlands. 15-19 July 2002. American Meteorological Society, 27-30.

- Schröter, J., Ruppert, J., Delany, A.C. and Foken, T., 2004. Horizontale advective Einflüsse auf den CO<sub>2</sub>-Austausch eines Fichtenbestandes, Deutsch - Österreichisch - Schweizerische Meteorologen - Tagung (DACH), Karlsruhe, Germany, pp. 6.
- Thomas, C., Ruppert, J., Lüers, J., Schröter, J., Mayer, J.C. and Bertolini, T., 2004. Documentation of the WALDATEM-2003 Experiment, 28.4.-3.8.2003. Arbeitsergebnisse 24, Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie. Print, ISSN 1614-8916.
- Wichura, B; Buchmann, N; Foken, T: CO<sub>2</sub>-Austauschprozesse über einem Fichtenbestand anhand von <sup>13</sup>C und CO<sub>2</sub>-Flussmessungen und Waveletanalysen, Österr. Beitr. Meteorol. & Geophys.(Extended Abstract and pdf-file on CD), 27, 203 (2001)
- Wichura, B; Buchmann, N; Foken, T; Mangold, A; Heinz, G; Rebmann, C: Pools und Flüsse des stabilen Kohlenstoffisotops <sup>13</sup>C zwischen Boden, Vegetation und Atmosphäre in verschiedenen Pflanzengemeinschaften des Fichtelgebirges, Bayreuther Forum Ökologie, 84, 123-153 (2001)
- Wichura, B; Buchmann, N; Foken, T: Carbon dioxide exchange characteristics above a spruce forest. 25th Symp. Agric. & Forest Meteor., Norfolk, May 20-24, 2002, Am. Meteorol. Soc., 63-64 (2002)
- Wichura, B; Ruppert, J; Delany, AC; Buchmann, N; Foken, T: Structure of carbon dioxide exchange processes above a spruce forest in Matzner, E.: Ecological Studies, Biogeochemistry of forested catchments in a changing environment: a german case study, Springer Verlag, 172, 161-176 (2004)

### 4.3 Vorträge

- Foken, T. (2002). Advances in Micrometeorology. University of Georgia, Griffin, May 17, 2002
- Foken, T. (2002). Post-field data quality controls. 2nd AMERIFLUX-Workshop, Corvallis OR., Aug. 27-30, 2002
- Foken, T. (2003). Qualitätsbewertung von Energie- und Stoffflüssen, Institut für Troposphärenforschung, Leipzig, 06. Februar 2003.
- Foken, T. (2003). The eddy covariance method for flux measurements – new developments. Obukhov-Institute, Moscow, 23. Sept. 2003.
- Foken, T., Thomas, C., Ruppert, J., Lüers, J. and Göckede, M., 2004. Turbulent exchange processes in and above tall vegetation, 16th Symposium on Boundary Layers and Turbulence. American Meteorological Society, Portland, ME.
- Lüers, J., Thomas, C., Ruppert, J. and Foken, T., 2004. Wind, Lufttemperatur und Kohlendioxidprofile in einem Fichtenforst während des WALDATEM-2003 Sommerexperimentes, Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologen-Tagung, Karlsruhe, Germany, pp. (Extended Abstract and pdf-file on CD).
- Mauder, M., Foken, T., Göckede, M., Liebethal, C., Ruppert, J. and Bertolini, T., 2003. Dokumentation des Experimentes LITFASS-2003, 19.5.-20.6.2003  
Dokumentation des Experimentes GRASATEM-2003, 14.5.-1.6.2003. Arbeitsergebnisse 23, Abteilung Mikrometeorologie, Bayreuth, 47 pp.
- Rebmann, C., Anthoni, P., Falge, E., Göckede, M., Mangold, A., Subke, J.A., Thomas, C., Wichura, B., Schulze, E.D., Tenhunen, J.D. and Foken, T., 2004. Carbon Budget of a Spruce Forest Ecosystem. In: E. Matzner (Editor), Biogeochemistry of Forested Catchments in a Changing Environment: A case study in NE-Bavaria, Germany. Ecological Studies. Springer, Heidelberg, pp. 143-159.
- Rummel, U., Ammann, C., Gut, A., Foken, Th., Andreae, M. O., Meixner, F.X. (2003). Characteristic time scales of turbulent transport chemistry, and plant physiology within a tropical rain forest: the change of nitrogen oxide and ozone, EGU/AGU, Nizza, 6.-11. April 2003.
- Ruppert, J. and Foken, T., 2003. Pools und Flüsse des stabilen Kohlenstoffisotopes <sup>13</sup>C zwischen Boden, Vegetation und Atmosphäre in verschiedenen Pflanzengemeinschaften des Fichtelgebirges. Bayreuther Forum Ökologie (bfö), 84: 123-153.
- Ruppert, J., Rothe, M., Jordan, A., Brand, W.A., Delany, A.C., Buchmann, N. and Foken, T., (2004). Whole-air Relaxed Eddy Accumulation for the Measurement of Isotope and Trace-Gas Fluxes. SIBAE-BASIN Conference. Interlaken, Switzerland. April 1-3, 2004.
- Ruppert, J., Thomas, C. and Foken, T., (2004). CO<sub>2</sub>- und <sup>13</sup>C-Isotopenflüsse für die Untersuchung der Dynamik des CO<sub>2</sub> Austausches zwischen Ökosystem und Atmosphäre. Deutsch - Österreichisch - Schweizerische Meteorologen - Tagung (DACH). Karlsruhe, Germany. 7 - 10 Aug. 2004.
- Ruppert, J; Wichura, B; Delany, AC; Foken, T: Eddy sampling methods, A comparison using simulation results. 15th Symp. on Boundary Layer and Turbulence, Wageningen, 15-19 July 2002, Am. Meteorol. Soc., 27-30 (2002)
- Ruppert, J., Wichura, B., Delany, A.C., Foken, T. (2003). Eddy Sampling Methods, A Comparison using Simulation Results. EGS, AGU, EGU Joint Assambly, Nice, France, April 6th – 11th, 2003.

- Schröter, J., Ruppert, J., Delany, A.C. and Foken, T., 2004. Horizontale advective Einflüsse auf den CO<sub>2</sub>-Austausch eines Fichtenbestandes, Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologen-Tagung, Karlsruhe, Germany, pp. (Extended Abstract and pdf-file on CD).
- Thomas, C., Ruppert, J., Lüers, J., Schröter, J., Mayer, J.C. and Bertolini, T., 2003. Documentation of the WALDATEM-2003 Experiment, 28.4.-3.8.2003. Arbeitsergebnisse 24, Abteilung Mikrometeorologie, Bayreuth, 59 pp.
- Thomas, C., Ruppert, J., Lüers, J., Olesch, J., Bertolini, T., Mayer, J.-C., Schröter, J., Delany, A.C. and Foken, T., 2004. Komplexes Wald-Grenzschicht Experiment WALDATEM-2003, Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologen-Tagung, Karlsruhe, Germany, pp. (Extended Abstract and pdf-file on CD).
- Wichura, B; Buchmann, N; Foken, T: Carbon dioxide exchange characteristics above a spruce forest. 25th Symp. Agric. & Forest Meteor., Norfolk, May 20-24, 2002, Am. Meteorol. Soc., 63-64 (2002)
- Wichura, B; Buchmann, N; Foken, T: CO<sub>2</sub>-Austauschprozesse über einem Fichtenbestand anhand von <sup>13</sup>C und CO<sub>2</sub>-Flussmessungen und Waveletanalysen, Österr. Beitr. Meteorol. & Geophys.(Extended Abstract and pdf-file on CD), 27, 203 (2001)
- Wichura, B., Ruppert, J., Delany, A.C., Buchmann, N. and Foken, T., 2004. Structure of carbon dioxide exchange processes above a spruce forest. In: E. Matzner (Editor), Biogeochemistry of Forested Catchments in a Changing Environment: A case study in NE-Bavaria, Germany. Ecological Studies. Springer, Heidelberg, pp. 161-176.

#### 4.4 Poster

- Foken, T; Kartschall, T; Badeck, F; Waloszczyk, K; Wichura, B; Gerchau, J: Reaktionszeiten im System Atmosphäre-Pflanze, gemessen während der totalen Sonnenfinsternis in Süddeutschland am 11. August 1999, Österr. Beitr. Meteorol. & Geophys.(Extended Abstract and pdf-file on CD), 27, 208 (2001)
- Foken, T., Anthoni, P., Göckede, M., Lüers, J., Rebmann, C., Ruppert, J., Thomas, C. and Wichura, B., 2004. Carbon Budget of a Spruce Forest Ecosystem, The Weidenbrunnen Site at 775 m a.s.l, 1997–2003. The FLUXNET 2004 Open Workshop. Florence, Italy. 13 - 15 December 2004, (poster).
- Foken, T., Thomas, C., Lüers, J., Ruppert, J. and Göckede, M., 2004. Turbulent Exchange Processes in and Above Tall Vegetation. The FLUXNET 2004 Open Workshop. Florence, Italy. 13 - 15 December 2004, (poster).
- Foken, T., Thomas, C., Ruppert, J., Lüers, J. and Göckede, M., 2004. Turbulent Exchange processes in and above tall vegetation. 26th Conference on Agricultural and Forest Meteorology. Vancouver, British Columbia, Canada. 23 - 26 August 2004, (poster).
- Lüers, J., Thomas, C., Ruppert, J., Bertolini, T. and Foken, T., 2004. Wind, air temperature and CO<sub>2</sub> profiles of a tall spruce forest during WALDATEM-2003 summer experiment. EGU 1st General Assambly. Nice, France. April 25-30.
- Ruppert, J., Mauder, M., Lüers, J. and Foken, T., 2004. A New Gap Filling Approach For Eddy Covariance Data. The FLUXNET 2004 Open Workshop. Florence, Italy. 13 - 15 December 2004, (poster).
- Ruppert, J., Rothe, M., Jordan, A., Brand, W.A., Delany, A.C., Buchmann, N. and Foken, T., 2004. Whole-air Relaxed Eddy Accumulation for the Measurement of Isotope and Trace-Gas Fluxes. SIBAE-BASIN Conference. Inter-laken, Switzerland. April 1-3, 2004, (poster).
- Ruppert, J., Rothe, M., Jordan, A., Delany, A.C., Buchmann, N. and Foken, T., 2004. Whole-Air Relaxed Eddy Accumulation for the Measurement of Isotope and Trace-Gas Fluxes. The FLUXNET 2004 Open Workshop. Florence, Italy. 13 - 15 December 2004, (poster).
- Ruppert, J; Wichura, B; Delany, AC; Foken, T: Methoden zur Messung turbulenter Spurengasflüsse im Vergleich, Österr. Beitr. Meteorol. & Geophys.(Extended Abstract and pdf-file on CD), 27, 220 (2001)
- Schröter, J., Ruppert, J., Delany, A.C. and Foken, T., 2004. Horizontale CO<sub>2</sub>-Advektion in einem Fichtenbestandes. Deutsch - Österreichisch - Schweizerische Meteorologen - Tagung (DACH). Karlsruhe, Germany. 7 - 10 Aug. 2004, (poster).
- Thomas, C., Ruppert, J., Lüers, J., Olesch, J., Bertolini, T., Mayer, J.C., Schröter, J., Delany, A.C. and Foken, T., 2004. Komplexes Wald-Grenzschicht Experiment WALDATEM-2003. Deutsch - Österreichisch - Schweizerische Meteorologen - Tagung (DACH). Karlsruhe, Germany. 7. - 10. Aug. 2004, (poster).

## 5. Literatur

- Aubinet, M., Grelle, A., Ibrom, A., Rannik, U., Moncrieff, J., Foken, T., Kowalski, A.S., Martin, P.H., Berbigier, P., Bernhofer, C., Clement, R., Elbers, J., Granier, A., Grunwald, T., Morgenstern, K., Pilegaard, K., Rebmann, C., Snijders, W., Valentini, R. and Vesala, T., 2000. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: The EUROFLUX methodology, *Advances in Ecological Research*, Vol 30. *Advances in Ecological Research*. Academic Press Inc, San Diego, pp. 113-175.
- Aubinet, M., Heinesch, B. and Yernaux, M., 2003. Horizontal and vertical CO<sub>2</sub> advection in a sloping forest. *Boundary-Layer Meteorol.*, 108: 397-417.
- Bowling, D.R., Delany, A.C., Turnipseed, A.A., Baldocchi, D.D. and Monson, R.K., 1999. Modification of the relaxed eddy accumulation technique to maximize measured scalar mixing ratio differences in updrafts and downdrafts. *Journal of Geophysical Research*, 104: 9121-9133.
- Bowling, D.R., Pataki, D.E. and Ehleringer, J.R., 2003. Critical evaluation of micrometeorological methods for measuring ecosystem-atmosphere isotopic exchange of CO<sub>2</sub>. *Agric. For. Meteorol.*, 116: 159-179.
- Bowling, D.R., Tans, P.P. and Monson, R.K., 2001. Partitioning net ecosystem carbon exchange with isotopic fluxes of CO<sub>2</sub>. *Global Change Biol.*, 7: 127-145.
- Bowling, D.R., Turnipseed, A.A., Delany, A.C., Baldocchi, D.D., Greenberg, J.P. and Monson, R.K., 1998. The use of relaxed eddy accumulation to measure biosphere-atmosphere exchange of isoprene and of other biological trace gases. *Oecologia*, 116: 306-315.
- Buchmann, N. and Kaplan, J.O., 2001. Carbon isotope discrimination of terrestrial ecosystems - how well do observed and modeled results match? In: E.D. Schulze, M. Heimann, P. Harrison Sandy, E. Holland, J. Lloyd, I.C. Prentice and D. Schimel (Editors), *Global biogeochemical cycles in the climate system*. Academic Press, San Diego, pp. 253-266.
- Businger, J.A. and Oncley, S.P., 1990. Flux Measurement with Conditional Sampling. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 7: 349-352.
- Falge, E., Baldocchi, D., Olson, R., Anthoni, P., Aubinet, M., Bernhofer, C., Burba, G., Ceulemans, R., Clement, R., Dolman, H., Granier, A., Gross, P., Grunwald, T., Hollinger, D., Jensen, N.O., Katul, G., Keronen, P., Kowalski, A., Lai, C.T., Law, B.E., Meyers, T., Moncrieff, H., Moors, E., Munger, J.W., Pilegaard, K., Rannik, U., Rebmann, C., Suyker, A., Tenhunen, J., Tu, K., Verma, S., Vesala, T., Wilson, K. and Wofsy, S., 2001. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agric. For. Meteorol.*, 107: 43-69.
- Feigenwinter, C., Bernhofer, C. and Vogt, R., 2004. The influence of advection on the short term CO<sub>2</sub>-budget in and above a forest canopy. *Boundary-Layer Meteorol.*, 113: 201-224.
- Finnigan, J.J., Clement, R., Malhi, Y., Leuning, R. and Cleugh, H.A., 2003. A re-evaluation of long-term flux measurement techniques - Part I: Averaging and coordinate rotation. *Boundary-Layer Meteorol.*, 107: 1-48.
- Foken, T., 2003. *Angewandte Meteorologie, Mikrometeorologische Methoden*. Springer, Heidelberg, 289 pp.
- Ham, J.M. and Heilman, J.L., 2003. Experimental test of density and energy-balance corrections on carbon dioxide flux as measured using open-path eddy covariance. *Agron. J.*, 95: 1393-1403.
- Hui, D.F., Luo, Y.Q. and Katul, G., 2003. Partitioning interannual variability in net ecosystem exchange between climatic variability and functional change. *Tree Physiol.*, 23: 433-442.
- Leuning, R. and Judd, M.J., 1996. The relative merits of open- and closed-path analysers for measurement of eddy fluxes. *Global Change Biol.*, 2: 241-253.
- Lloyd, J., Kruijt, B., Hollinger, D.Y., Grace, J., Francey, R.J., Wong, S.-C., Kelliher, F.M., Miranda, A.C., Farquhar, G.D., Gash, J.H.C., Vygodskaya, N.N., Wright, I.R., Miranda, H.S. and Schulze, E.-D., 1996. Vegetation Effects on the Isotopic Composition of Atmospheric CO<sub>2</sub> at Local and Regional Scales: Theoretical Aspects and a Comparison Between Rain Forest in Amazonia and a Boreal Forest in Siberia. *Australian Journal of Plant Physiology*, 23: 371-399.
- Lloyd, J. and Taylor, J.A., 1994. On the temperature dependence of soil respiration. *Funct. Ecol.*, 8: 315-323.
- Mauder, M. and Foken, T., 2004. Documentation and instruction manual of the eddy covariance software package TK2. *Arbeitsergebnisse 26, Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie*. Print, ISSN 1614-8916.
- Mauder, M., Foken, T., Göckede, M., Liebethal, C., Ruppert, J. and Bertolini, T., 2003. Dokumentation des Experimentes LITFASS-2003, 19.5.-20.6.2003, Dokumentation des Experimentes GRASATEM-2003, 14.5.-1.6.2003. *Arbeitsergebnisse 23, Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie*. Print, ISSN 1614-8916.

- Panofsky, H.A., Tennekes, H., Lenschow, D.H. and Wyngaard, J.C., 1977. The characteristics of turbulent velocity components in the surface layer under convective conditions. *Boundary-Layer Meteorol.*, 11: 355-361.
- Rebmann, C., 2003. Kohlendioxid-, Wasserdampf und Energieaustausch eines Fichtenwaldes in Mittelgebirgslage in Nordostbayern. PhD Thesis, University of Bayreuth, Bayreuth, 140 pp.
- Rebmann, C., Anthoni, P., Falge, E., Göckede, M., Mangold, A., Subke, J.A., Thomas, C., Wichura, B., Schulze, E.D., Tenhunen, J.D. and Foken, T., 2004. Carbon Budget of a Spruce Forest Ecosystem. In: E. Matzner (Editor), *Biogeochemistry of Forested Catchments in a Changing Environment: A german case study*. Ecological Studies. Springer, Heidelberg, pp. 143-159.
- Rebmann, C., Subke, J.-A. and Foken, T., 2001. CO<sub>2</sub>-Flüsse: Bestandesebene und Bodenatmung. *Bayreuther Forum Ökologie*, 90: 85-90.
- Ruppert, J. and Foken, T., 2003. Pools und Flüsse des stabilen Kohlenstoffisotopes <sup>13</sup>C zwischen Boden, Vegetation und Atmosphäre in verschiedenen Pflanzengemeinschaften des Fichtelgebirges. *Bayreuther Forum Ökologie (bfö)*, 84: 123-153.
- Schopfer, P., Brennicke, A. and Mohr, H., 1999. Pflanzenphysiologie mit 46 Tabellen Peter Schopfer Axel Brennicke Begr von Hans Mohr. Springer-Lehrbuch. Springer, Berlin [u.a.], XX, 695 S. Ill., graph. Darst. pp.
- Suyker, A.E. and Verma, S.B., 1993. Eddy correlation measurement of CO<sub>2</sub> flux using a closed- path sensor: theory and field tests against an open-path sensor. *Boundary-Layer Meteorol.*, 64: 391-407.
- Thomas, C., 2001. Integral Turbulence Characteristics and Their Parameterisations. diploma Thesis, University of Bayreuth, Bayreuth, 107 pp.
- Thomas, C. and Foken, T., 2002. Re-evaluation of Integral Turbulence Characteristics and their Parameterisations, 15th Symposium on Boundary Layers and Turbulence. *Am.Meteorol.Soc.*, Wageningen, The Netherlands, pp. 129-132.
- Thomas, C., Ruppert, J., Lüers, J., Schröter, J., Mayer, J.C. and Bertolini, T., 2004. Documentation of the WALDATEM-2003 Experiment, 28.4.-3.8.2003. Arbeitsergebnisse 24, Universität Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie. Print, ISSN 1614-8916.
- Werner, R.A., Rothe, M. and Brand, W.A., 2001. Extraction of CO<sub>2</sub> from air samples for isotopic analysis and limits to ultra high precision delta O-18 determination in CO<sub>2</sub> gas. *Rapid Commun. Mass Spectrom.*, 15: 2152-2167.
- Wichura, B., 2005. Untersuchungen zum Kohlendioxid-Austausch über einem Fichtenwaldbestand auf der Grundlage von Hyperbolic-Relaxed-Eddy-Accumulation Messungen für das stabile Kohlenstoffisotop <sup>13</sup>C und von Waveletanalysen. PhD Thesis, University of Bayreuth, Bayreuth. (in preparation)
- Wichura, B., Buchmann, N., Foken, T., Mangold, A., Heinz, G. and Rebmann, C., 2001. Pools und Flüsse des stabilen Kohlenstoffisotopes <sup>13</sup>C zwischen Boden, Vegetation und Atmosphäre in verschiedenen Pflanzengemeinschaften des Fichtelgebirges. *Bayreuther Forum Ökologie (bfö)*, 84: 123-153.
- Wichura, B., Ruppert, J., Delany, A.C., Buchmann, N. and Foken, T., 2004. Structure of carbon dioxide exchange processes above a spruce forest. In: E. Matzner (Editor), *Biogeochemistry of Forested Catchments in a Changing Environment: A german case study*. Ecological Studies. Springer, Heidelberg, pp. 161-176.

## 6. Danksagung

Wir möchten uns ausdrücklich bedanken bei Dr. Antony C. Delany vom National Center for Atmospheric Research (NCAR) in Boulder, USA, und Dr. Dave Bowling von der University of Utah, für die Beratung bei Planung und Design des Whole-Air REA Systems. Willi A. Brand vom Isotopenlabor des Max-Planck Institutes für Biogeochemie in Jena hat entscheidend zur Qualitätssicherung während der technischen Realisierung beigetragen und Michael Rothe und Armin Jordan haben die Messung der zahlreichen Luftproben mit hoher Präzision durchgeführt. Danken möchten wir auch Johannes Olesch und den Mitarbeitern der Mechanik- und Elektronikwerkstätten an der Universität Bayreuth für die vielfältige Unterstützung. Der Einsatz des Hydra Systems vom NCAR hat die Messungen der CO<sub>2</sub>-Advektion im Rahmen des WALDATEM-2003 Experimentes möglich gemacht. Teresa Bertolin hat im Rahmen beider Experimente die Messungen in vielfacher Weise unterstützt. Joel Schröter betreute die Advektionsmessungen im Stammraum während



WALDATEM-2003. Prof. Andreas Richter, Universität Wien, ermöglichte die Bestimmung der Isotopensignatur in den Zuckern unserer Biomasseproben.

**Volumes in the series ,University of Bayreuth, Department of Micrometeorology, Arbeitsergebnisse'**

<b>No</b>	<b>Name</b>	<b>Titel</b>	<b>Date</b>
01	Foken	Der Bayreuther Turbulenzknecht	01/99
02	Foken	Methode zur Bestimmung der trockenen Deposition von Bor	02/99
03	Liu	Error analysis of the modified Bowen ratio method	02/99
04	Foken et al.	Nachtfrostgefährdung des ÖBG	03/99
05	Hierteis	Dokumentation des Experimentes Dlouha Louka	03/99
06	Mangold	Dokumentation des Experiments am Standort Weidenbrunnen, Juli/August 1998	07/99
07	Heinz, Handorf, Foken	Strukturanalyse der atmosphärischen Turbulenz mittels Wavelet-Verfahren zur Bestimmung von Austauschprozessen über dem antarktischen Schelfeis	07/99
08	Foken	Comparison of the sonic anemometer Young Model 81000 during VOITEX-99	10/99
09	Foken et al.	Lufthygienisch-Bioklimatische Kennzeichnung des oberen Egertales, Zwischenbericht 1999	11/99
10	Sodemann	Stationsdatenbank zum BStMLU-Projekt Lufthygienisch-Bioklimatische Kennzeichnung des oberen Egertales	03/00
11	Neuner	Dokumentation zur Erstellung der meteorologischen Eingabedateien für das Modell BEKLIMA	10/00
12	Foken et al.	Dokumentation des Experimentes VOITEX-99	12/00
13	Bruckmeier et al.	Documentation of the experiment EBEX-2000, July 20 to August 24, 2000	01/01

14	Foken et al.	Lufthygienisch-Bioklimatische Kennzeichnung des oberen Egertales	02/01
15	Göckede	Die Verwendung des footprint-Modells nach SCHMID (1997) zur stabilitätsabhängigen Bestimmung der Rauigkeitslänge	03/01
16	Neuner	Berechnung der Evapotranspiration im ÖBG (Universität Bayreuth) mit dem SVAT-Modell BEKLIMA	05/01
17	Sodemann	Dokumentation der Software zur Bearbeitung der FINTUREX-Daten	08/02
18	Göckede et al.	Dokumentation des Experiments STINHO-1	08/02
19	Göckede et al.	Dokumentation des Experiments STINHO-2	12/02
20	Göckede et al.	Characterisation of a complex measuring site for flux measurements	12/02
21	Liebenthal	Strahlungsmessgerätevergleich während des Experimentes STINHO_1	01/03
22	Mauder et al.	Dokumentation des Experiments EVA_GRIPS	03/03
23	Mauder et al.	Dokumentation der Litfass-2003 und GRASATEM-2003 Experimente	
24	Thomas et al.	Dokumentation des WALDATEM-2003 Experimentes	05/04
25	Göckede et al.	Qualitätsbegutachtung komplexer mikrometeorologischer Messstationen im Rahmen des VERTIKO-Projekts	11/04
26	Mauder und Foken	Documentation and Instruction Manual of the Eddy Covariance Software Package TK2	12/04
27	Herold et al.	The OP-2 open path infrared gas analyser for CO <sub>2</sub> and H <sub>2</sub> O	01/05
28	Ruppert	ATEM software for Atmospheric Turbulent Exchange Measurements using Eddy Covariance and Relaxed Eddy Accumulation Systems and Bayreuth whole-air REA system setup	04/05
29	Foken (Hrsg.)	Klimatologische und mikrometeorologische Forschungen im Rahmen des Bayreuther Institutes für Terrestrische Ökosystemforschung (BITÖK), 1989 – 2004	06/05